# DYNAMISCHE CHARAKTERISTIKEN DER WEHNELTSCHEN VENTILRÖHRE.

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT

DER

GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT ZU GÖTTINGEN

VORGELEGT

VON

**ROYAL A. PORTER**
AUS SYRACUSE, NEW YORK, V. ST. A.

ACAD. LUGD. BAT. BIBL.

GÖTTINGEN 1912

LEIPZIG,
JOHANN AMBROSIUS BARTH.
1912.

Von der mathematisch-naturwissenschaftlichen Abteilung der Fakultät angenommen.

Referent: Herr Prof. Dr. Herm. Th. Simon.

Tag der mündlichen Prüfung: 31. Juli 1912.

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.

# Inhaltsübersicht.


Seite

I. Einleitung . . . . . 5

II. Eigenschaften der Oxydkathode . . . . . 11

III. Die Versuche . . . . . 14

A. Methode der Untersuchung . . . . . 14

B. Vorversuche . . . . . 14

C. Endgültige Versuche . . . . . 18

1. Charakteristiken bei Anwesenheit von Quecksilberdampf 20

a) Einzelne dynamische Charakteristiken bei verschiedenen Betriebsspannungen . . . . . 20

b) Aufnahmen mit kontinuierlicher Variation der Versuchsbedingungen . . . . . 22

c) Statische Charakteristiken . . . . . 32

d) Unterbrechung des Stromes bei tiefem Drucke . . 33

2. Charakteristiken bei Ausschluß von Quecksilberdampf . 34

3. Charakteristiken bei Wasserstoffüllung . . . . . 40

4. Charakteristiken bei Sauerstoffüllung . . . . . 44

D. Zusammenfassung . . . . . 48

IV. Diskussion . . . . . 49

V. Ergebnisse . . . . . 53

## I. Einleitung.

Auf die von ihm entdeckte Eigenschaft der glühenden Oxydelektroden, Elektronen in großer Anzahl auszusenden und dadurch als Kathoden in Entladungsröhren den Kathodenfall stark herabzusetzen, hat A. Wehnelt die Konstruktion eines elektrischen Ventilrohres gegründet. Es ist eine evakuierte Gasentladungsröhre mit einer kalten Metallelektrode und einer durch Hilfsstrom glühend gehaltenen Oxydelektrode. Legt man an ein solches Rohr Wechselspannung an, so geht ein Strom nur in derjenigen Richtung hindurch, welche die glühende Oxydelektrode zur Kathode macht. Die Anwendbarkeit dieses Ventilrohres für mannigfache Zwecke der angewandten Elektrizität ist schon von Wehnelt gezeigt worden. So z. B. zur Ladung von Akkumulatoren und zum Betrieb von Gleichstromlampen mit Wechselstrom oder Drehstrom, zur Trennung von Schließungs- und Öffnungsstrom bei Induktorien, zum Betriebe von Induktorien mit elektrolytischen Unterbrechern bei Verwendung von Wechselstrom, als Empfänger bei der drahtlosen Telegraphie in Verbindung mit hochempfindlichen Gleichstromgalvanometern. Allerdings hat sich einer allgemeinen Einführung dieser Ventile in der Praxis bisher stets die rasche Zerstörung entgegengestellt, der die Oxydschicht der Glühelektrode ausgesetzt ist. Im Laboratorium aber liefert die Wehneltsche Ventilröhre ein experimentelles Hilfsmittel von mannigfaltiger Anwendbarkeit.

Die Eigenschaften der glühenden Oxydelektroden, auf denen das Wehneltsche Ventilrohr beruht, sind von Wehnelt und seinen Schülern nach den verschiedensten Richtungen hin aufgeklärt worden. Wie immer, wo es sich um Leitereigenschaften handelt, ist es die Beziehung zwischen

Klemmenspannung und Stromstärke, die Charakteristik, und ihre Abhängigkeit von den verschiedenen physikalischen Umständen, auf die es hier zunächst wesentlich ankommt. Soweit die statische Charakteristik in Frage kommt, d. h. der Zusammenhang zwischen Klemmenspannung und Stromstärke bei stationärem Gleichstrom, erscheint die Frage ziemlich erschöpfend geklärt. Dagegen liegen noch so gut wie keine Messungen vor über die dynamische Charakteristik solcher Röhren, d. h. jenen Zusammenhang bei Betrieb mit Wechselströmen. Nun ist aber gerade die Verwendung der Röhre als Ventilröhre ein wesentlich dynamischer Vorgang. Und da nach Erfahrungen mit anderen Leitern zu erwarten war, daß auch hier die dynamischen Charakteristiken von den statischen verschieden sein könnten so erhielt ich von Professor H. Th. Simon die Anregung, Beobachtungen über die dynamischen Charakteristiken des Wehneltschen Ventilrohres anzustellen, die ich mit dieser Arbeit vorlege.

Auf die Abweichung der dynamischen Charakteristiken der Leiter von ihren statischen und auf die Bedeutung der dynamischen Charakteristik für die Erforschung der Arbeitsvorgänge in stromdurchflossenen Apparaten hat zuerst H. Th. Simon[1]) mit Nachdruck hingewiesen; in genereller Weise namentlich in seinen Vorlesungen über angewandte Elektrizität. Die folgende Darstellung schließt sich dieser Vorlesung an. Sein in einer Reihe von Arbeiten des Instituts für angewandte Elektrizität zugrunde liegender Gedankengang ist — vom Einzelproblem losgelöst — etwa folgender:

Wenn Elektrizität durch die Klemmen in einen Apparat einströmt, so tritt dabei die von außen aufgeprägte Klemmenspannung in Arbeitsbeziehung zu den im Inneren des Apparates wirksamen oder wirksam werdenden Gegenspannungen, derart, daß nach dem Prinzip von actio et reactio die Summe der Gegenspannungen der aufgeprägten Klemmenspannung in jedem Moment das Gleichgewicht hält. Wenn man von

---

1) H. Th. Simon, Physik. Zeitschr. 6. p. 297—319. 1905; 7. p. 433 bis 445. 1906.

Gegenspannungen absieht, die unabhängig von der einströmenden Elektrizität im Apparate ihren Sitz haben, wie z. B. bei galvanischen Elementen, so gibt es prinzipiell dreierlei Arten von Gegenspannungen,

a) solche, die dadurch wirksam werden, daß beim Einströmen der Elektrizität in den Apparat die räumliche Anordnung von Elektrizitätsmengen in dem Apparat verändert wird. Derartige Gegenspannungen sind z. B. die beim Entstehen eines Stromes in einem Leiter wegen der Leiterkapazität erregten Kapazitätsspannungen, die in einem Elektrolyten infolge der Änderung der Ionendichte durch den elektrischen Strom hervorgerufenen Gegenspannungen der Polarisation usw. Sie sind eine Funktion der mit dem Strome verschobenen Elektrizitätsmenge $q = \int i\,dt$, im einfachsten Falle ihr proportional;

b) solche, die — analog Reibungskräften in der Mechanik — durch die Geschwindigkeit der bewegten Elektrizitätsmengen bestimmt und darum eine Funktion der Stromstärke $dq/dt = i$ sind.

Eine derartige Gegenspannung entwickeln z. B. die Leiter durch ihren Ohmschen Widerstand, und zwar ist sie in diesem Falle, solange die Temperatur konstant gehalten wird, $= iw$, d. h. der Stromstärke proportional;

c) solche, die dadurch wirksam werden, daß durch das Einströmen der Elektrizität in den Apparat in ihm Elektrizitätsmengen beschleunigt werden. Sie sind also Funktionen der Änderungsgeschwindigkeit der Stromstärke

$$\frac{di}{dt} = \frac{d^2q}{dt^2}.$$

Derartige Gegenspannungen sind z. B. die in einer Selbstinduktionsspule erregten induktiven Spannungen, welche

$$= L\frac{di}{dt} \quad \text{also} \quad \frac{di}{dt}$$

proportional sind.

Diese drei Fälle erschöpfen das Problem; denn man kann ihnen praktisch alle auftretenden Gegenspannungen unterordnen.

Schickt man durch einen Apparat, der solche Gegenspannungen entwickelt, einen Gleichstrom, so wird er im stationären Zustande nur von solchen Gegenspannungen etwas merken lassen, die von Type *b* sind. Die Gegenspannungen von Type *a* und *c* können sich dagegen nur bei Stromänderungen entfalten, also beim Beschicken des Apparates mit Wechselstrom. Es werde Wechselstrom $i = I \sin \omega t$ durch den Apparat geschickt. Wie stellen sich die drei Typen der Gegenspannungen *a*, *b*, *c* dazu?

a) Die Gegenspannung sei z. B.

$$e_C = \frac{\int i\,dt}{C}$$

(Kapazität $C$ im Stromkreise)

$$e_C = -\frac{I}{C\omega} \cos \omega t = \frac{I}{C\omega} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

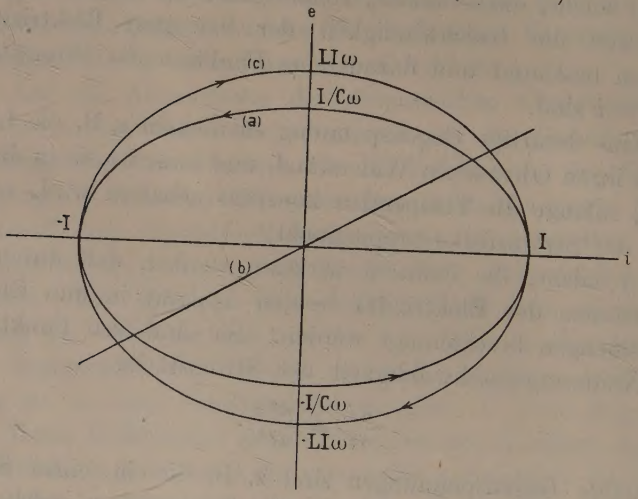



Fig. 1.

Zeichnet man die dynamische Charakteristik, so ergibt sich eine Ellipse, die im entgegengesetzten Uhrzeigersinn durchlaufen wird (Fig. 1a).

b) Die Gegenspannung sei $e_w = iw$

$$e_w = Iw \sin \omega t.$$

Die dynamische Charakteristik wird eine gerade Linie, die durch den Nullpunkt geht und nur im Quadranten 1 und 3 verläuft (Fig. 1b).

c) Die Gegenspannung sei $e_L = L \frac{di}{dt}$

$$e_L = L I \omega \cos \omega t = L I \omega \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Die Charakteristik wird eine Ellipse, die im Uhrzeigersinn durchlaufen wird (Fig. 1c).

Zieht man in allen vier Quadranten die Leistungshyperbeln $e\,i = \text{const}$ und beachtet das Vorzeichen, so sieht man, daß in der gewählten Darstellung die Quadranten 1 und 3 als Verbraucherquadranten bezeichnet werden können, weil der Apparat, solange seine Charakteristik in ihnen verläuft, Energie absorbiert. Quadranten 2 und 4 heißen Generatorquadranten, weil der Apparat, solange seine Charakteristik hier verläuft, Energie nach außen abliefert. Man erkennt, daß die Spannungen des Typs *a* und *c* mit Wechselstrom keine dauernde Energieumsetzung liefern können, weil die Charakteristiken in bezug auf die Generator- und Verbraucherquadranten völlig symmetrisch verlaufen (reversible Spannungen). Anders ist das mit dem Typus *b*, er ermöglicht eine dauernde Energieumwandlung mit Wechselstrom, da die Charakteristik dauernd in den Verbraucherquadranten verläuft (irreversible Spannung). Soll ein wechselstromdurchflossener Apparat dauernd Energie nach außen abliefern, also ein Wechselstromgenerator sein, so muß seine Charakteristik dauernd in den Quadranten 2 und 4 verlaufen, was z. B. erfüllt wird von einem Gleichstromlichtbogen, der von einem übergelagerten Wechselstrome durchflossen wird.

So bietet also die Erforschung der mit Wechselstrom erhaltenen dynamischen Charakteristik ein Mittel, von dem Vorhandensein von Spannungen des Typs *a* und *c* in einem Apparate Kenntnis zu erhalten, die bei Gleichstrombetrieb verborgen bleiben. Es ist dann Sache besonderer physikalischer Analyse, den Mechanismus des Auftretens der betr. Spannungen zu erforschen.

Häufig ist es vorteilhaft, die dynamische $q\,e$-Charakteristik aufzunehmen, d. h. die Beziehung zwischen der Klemmenspannung $e$ des Apparates und der in ihn eingewanderten Elektrizitätsmenge. Diese letztere läßt sich nach Barkhausen[1]) messen, indem man vor den Apparat eine Kapazität $C'$ schaltet und deren Klemmenspannung oszillographisch mißt. Die drei in Fig. 1 behandelten Fälle stellen sich in diesem Falle so dar, wie es Fig. 2 zeigt.

$$\text{a)}\quad e_C = \frac{I}{C\omega}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$q = \int i\,dt = \frac{I}{\omega}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

$$\text{b)}\quad e_w = I w \sin(\omega t)$$

$$q = \frac{I}{\omega}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

$$\text{c)}\quad e_L = I\omega L \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$q = \frac{I}{\omega}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

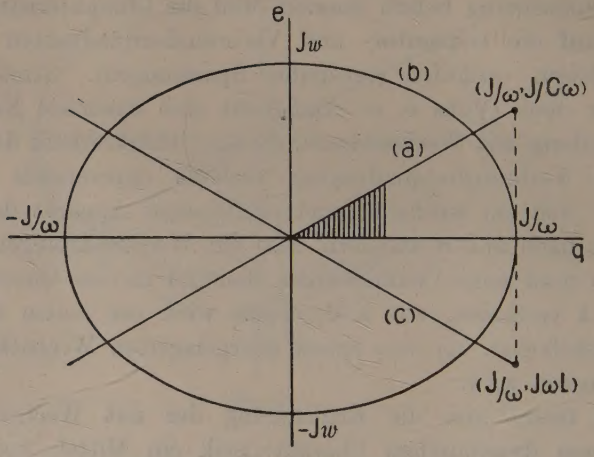



Fig. 2.

In diesem Diagramm lassen sich die in jedem Zeitpunkt ein- und ausgewanderten Arbeiten durch die Fläche erkennen,

1) H. Barkhausen, Dissertation Göttingen 1907, S. 8.

welche die Charakteristik mit der $q$-Achse einschließt (vgl. z. B. das schraffierte Flächenstück der Linie $a$). Man erkennt wieder, daß $a$ und $c$ bei Wechselstrombetrieb keine dauernde Energieumwandlung liefern, da die bei Wachsen von $q$ gebildete + -Fläche stets durch die bei der Abnahme gebildete — -Fläche aufgehoben wird. Anders im Falle b, wo die von der Charakteristik $b$ eingeschlossene Fläche die während einer Stromperiode umgesetzte Arbeit ergibt. Umlauf im entgegengesetzten Uhrzeigersinn bedeutet hier, daß der Apparat ein Verbraucher ist, im Uhrzeigersinn, daß er ein Generator ist. Dies gilt allgemein: Sobald sich eine geschlossene Schleife an der $qe$-Charakteristik zeigt, bedeutet das, daß Energie im Betrage der Fläche umgesetzt wird.

Auf Grundlage dieser allgemeinen methodischen Gesichtspunkte wurden die Messungen der dynamischen Charakteristiken des Wehneltschen Ventilrohres unternommen und diskutiert.

## II. Eigenschaften der Oxydkathode.

Von den Eigenschaften der Oxydkathode, auf der die Ventilwirkung der Wehneltröhre beruht, seien hier die wichtigsten zusammengestellt.[1])

1. Durch eine glühende Oxydkathode wird der Kathodenfall in einer Entladungsröhre stark herabgesetzt.

2. Diese Wirkung findet dadurch eine Erklärung, daß aus einer glühenden Kathode negative Elektronen in großer Zahl heraustreten. Da der Kathodenfall bei gewöhnlichen Entladungsröhren durch eine Verarmung des vor der Kathode liegenden Raumes an negativen Elektronen entsteht, so müssen im allgemeinen negative Ionen, die in diesen Raum hineingebracht werden, den Kathodenfall herabsetzen.

---

1) A. Wehnelt, Verh. d. D. Physik. Ges. **5.** p. 255—258. 1903; Ann. d. Phys. (4) **14.** p. 425—468. 1904; (4) **19.** p. 138—156. 1906; Physik. Zeitschr. **9.** p. 134—135. 1908. — A. Wehnelt u. F. Jentzsch, Verh. d. D. Physik. Ges. **10.** p. 605—615. 1908; Ann. d. Phys. (4) **28.** p. 537—552. 1909. — S. Marsh, Dissertation. Göttingen 1909.

3. Legt man an eine Entladungsröhre mit glühender Oxydkathode eine Spannungsdifferenz an, die man allmählich vergrößert, so wächst die Stromstärke, solange die dunkle Entladung aufrecht erhalten bleibt, bis zu einer Sättigungsstromstärke, die bekanntlich dadurch charakterisiert ist, daß alle aus der Kathode austretenden Elektronen alsbald durch Konvektion an die Anode geführt werden. Vergrößert man die Spannung weiter und weiter, so fangen Ionen an, sich an dem Strom zu beteiligen, die nicht aus der Kathode stammen, sondern durch „Ionenstoß" gebildet sind. Es setzt eine leuchtende Glimmentladung ein. Während nun bei gewöhnlichen Entladungsröhren Glimmentladung nur bei Spannungen von einigen Hundert Volt möglich ist, tritt sie bei einer glühenden Oxydkathode schon bei einer niedrigen Spannung von etwa 20—50 Volt auf. Vergrößert man die Stromstärke in diesem Fall mehr und mehr, so bleibt die Klemmenspannung nahezu konstant, bis eine von Druck und Temperatur abhängige Grenzstromdichte erreicht ist. Von nun an wächst die Stromstärke nur langsam, während die Spannung sehr schnell zunimmt. Die Grenzstromdichte ist diejenige Stromdichte, bei der die Elektronen aus dem dunklen Kathodenraum schneller fortgeführt werden, als sie aus der Oxydkathode ersetzt werden, so daß nun wiederum eine Verarmung an Elektronen dort auftritt. Hieraus folgt, daß die Grenzstromdichte mit der Zahl der vom Oxyde abgegebenen negativen Elektronen zusammenhängt, d. h. daß sie mit der Temperatur stark wachsen muß.

4. Da die Grenzstromdichten an Oxydkathoden bei höheren Temperaturen sehr große Werte erreichen, so ist es möglich, mit Hilfe einer solchen Gasentladungsröhre unter Benutzung niedriger Potentialdifferenzen beträchtliche Ströme durch die Entladungsröhre zu senden. Da andererseits eine glühende Oxydanode sich von gewöhnlichen Anoden nicht wesentlich unterscheidet, so erklärt sich, daß eine Entladungsröhre mit einer gewöhnlichen kalten und einer glühenden Oxydelektrode einer Wechselspannung gegenüber als Ventil wirken muß.

5. Wenn eine glühende Oxydelektrode Elektronen emittiert, so bedeutet das einen Energieverlust: sie muß sich rascher abkühlen, als wenn sie keine Elektronen emittiert. Mit anderen Worten: der Wärmeverlust eines hocherhitzten Körpers, der als Elektrode dient, ist größer, wenn der Körper Kathode ist, als wenn er Anode ist.

Die physikalische Erklärung der vorstehenden Tatsachen wird nach Richardson[1]) darin gefunden, daß von den auf einem Leiter befindlichen Elektronen einige stets gemäß dem Maxwellschen Verteilungsgesetze solche Geschwindigkeiten erreichen, daß sie die zum Austritt aus der Oberfläche erforderliche Energie besitzen. Richardson konnte auf Grund dieser Vorstellung ein durch das Experiment bestätigtes Gesetz für die Abhängigkeit des Elektronenaustritts von der Temperatur ableiten, welches sich auch bei Oxydkathoden bestätigt fand. In neuester Zeit hat indessen Fredenhagen[1]) gezeigt, daß sich Oxydelektroden nur dann von reinem Platin unterscheiden, wenn sie elektrisch geheizt werden. Nach ihm beruht die Wirkung der Oxydkathode darauf, daß sich durch die glühende Oxydschicht ein Teil des Heizstromes abzweigt und elektrolytische Prozesse in der Oxydschicht veranlaßt, deren chemische Reaktionen an der Oberfläche zu dem vermehrten Elektronenaustritt Anlaß geben. Für die bei den oben mitgeteilten Tatsachen zum Ausdruck kommende Wirkung der austretenden Elektronen auf das Entladungsphänomen wird durch diese neue Erklärung ihrer Entstehungsweise natürlich nichts geändert.

Wie nach dem Vorstehenden die statische Charakteristik einer mit Oxydkathode versehenen Gasentladungsröhre aussehen wird, läßt sich nur ganz schematisch voraussagen. Je nach Art und Druck des verwendeten Gases, nach Größe und Temperatur der verwendeten Oxydkathode wird sich das allgemeine Schema im einzelnen modifizieren. Auch die Beobachtungsmethode wird in mancher Hinsicht bestimmend

1) O. Richardson, Phil. Trans. (A) **201.** p. 497—549. 1903.
2) K. Fredenhagen, Physik. Zeitschr. **13.** p. 539—540. 1912.

sein. Einmal wird das Sättigungsstromgebiet zum Ausdruck gelangen, das andere Mal wird dasselbe in den Hintergrund treten und sogleich die leuchtende Glimmentladung einsetzen. Im letzten Falle wird man je nach der Größe der Oxydkathode oder dem Gasdrucke schon bei kleinen oder erst bei größeren Stromstärken an die Grenzstromdichte kommen. In der Tat zeigen die bisher vorliegenden Messungen der statischen Charakteristik in diesem Sinne die mannigfaltigsten Abweichungen voneinander.

## III. Die Versuche.

### A. Methode der Untersuchung.

Für die Verwendung der Wehneltröhre als Ventilröhre kommen nur stärkere Entladungsströme in Frage, Ströme, die außerhalb des Sättigungsstromgebietes liegen und im Gebiete des Glimmstromes verlaufen. Man konnte sich daher darauf beschränken, den Verlauf von Strom und Spannung mit Hilfe des Oszillographen zu verfolgen. Verwendet wurde ein Oszillograph von Siemens & Halske mit Schleifen, deren Eigenschwingungen ca. 3000 pro Sekunde betrugen; die Empfindlichkeit war ca. 30 Milliampere pro Zentimeter Ausschlag. Fig. 3 stellt die Schaltung dar.

Es wurden jedesmal Strom und Spannungskurven photographisch registriert und aus zusammengehörigen Werten die Charakteristiken konstruiert. Die Temperatur der Kathode wurde mit dem Wannerschen Pyrometer gemessen. Untersucht wurden zunächst die dynamischen Charakteristiken einer von Gundelach in den Handel gebrachten Ventilröhre; später wurde eine besondere Röhre hergestellt, an der die Versuchsbedingungen beliebig variiert werden konnten.

### B. Vorversuche mit einer „Gundelach"-Röhre.

Die von Gundelach in Gehlberg in den Handel gebrachte Ventilröhre besteht aus einer Glaskugel von rund 12 cm Durchmesser. Sie trägt in zwei angeschmolzenen Rohrstutzen je eine Anode aus Eisen. Die Kathode steht im

Mittelpunkte der Kugel und ist gebildet aus einer ca. 12 cm langen Platindrahtlitze, die mit einer Oxydschicht bedeckt ist. Die Kathode wurde durch einen Heizstrom auf eine Temperatur von etwa 1100° C gebracht.

Fig. 4 stellt die erhaltenen dynamischen Charakteristiken dar, und zwar sind drei Kurven aufgezeichnet, die verschie-

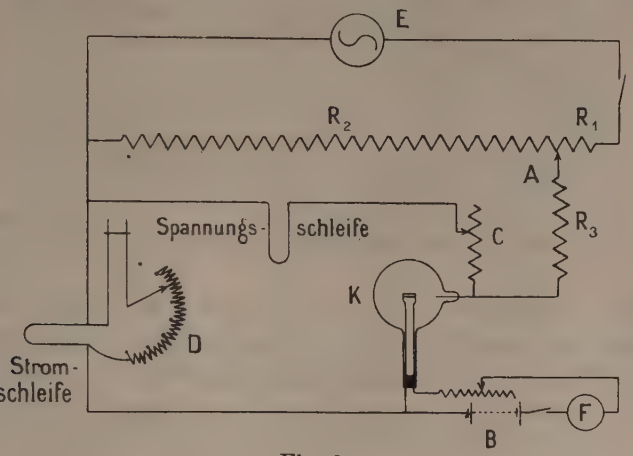



Fig. 3.

$E$ = die Stromquelle.
$A$ = ein verschiebbarer Kontakt, mit dem man die an der Röhre angelegte Spannung durch Abzweigung variieren kann.
$R_3$ = der regulierbare Vorschaltwiderstand.
$K$ = die Wehneltröhre.
$C$ = Vorschaltwiderstand für die Spannungsschleife des Oszillographen.
$D$ = Nebenschluß für die Stromschleife.
$B$ = Akkumulatoren, die den Heizstrom für die Kathode liefern.
$F$ = Amperemeter.

denen Maximalstromstärken entsprechen. Zuerst wurde Kurve 4, dann Kurve 7 und dann Kurve 8 aufgenommen. Man sieht, daß die Kurven mit abnehmender Stromstärke auf anderer Bahn laufen als sie mit zunehmendem Strom gelaufen sind, d. h. es zeigt sich in der Tat eine Hysteresis. Die Kurve 8 weist ein anomales Verhalten durch eine Schleifenbildung auf: während dieselbe bei ganz großer Stromstärke

in demselben Sinne durchlaufen wird wie die Kurven 4 und 7, wird der erste Teil im umgekehrten Sinne durchlaufen. Man sieht an den Kurven der Fig. 4, daß mit zunehmender Maximalstromstärke die Neigung der Schleifen mehr und mehr ab-

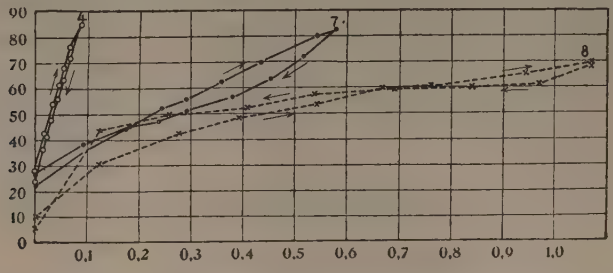



Fig. 4.
Gundelachröhre. Maximale Stromstärke variiert. Frequenz 55.

nimmt. Das erklärt sich wohl einfach daraus, daß mit zunehmender Stromstärke die Temperatur der Oxydkathode höher wird, da ja der Entladungsstrom sich in der Kathode über den Heizstrom lagert. An dieser Figur, wie auch an allen anderen Figuren, sind die Ordinaten in Volt und die Abszissen in Ampere angegeben.

Aufnahmen 13, 14a, 14b, Charakteristiken Fig. 5, sind so aufgenommen, daß bei konstanter Maschinenspannung der Vorschaltwiderstand variiert wurde. Man sieht, daß der Strom bei einer ganz bestimmten Spannung einsetzt und sehr schnell auf einen bestimmten Wert kommt, während die Spannung gleichzeitig kleiner wird. Wird beim Zurückfluten der Spannung eine gewisse Spannung erreicht, so wird der Strom wieder Null. Da bei den Aufnahmen bei dieser Röhre keine Gewähr ist, daß die Versuchsbedingungen festgehalten sind, so muß darauf verzichtet werden, aus den erhaltenen Aufnahmen spezielle Schlüsse zu ziehen.

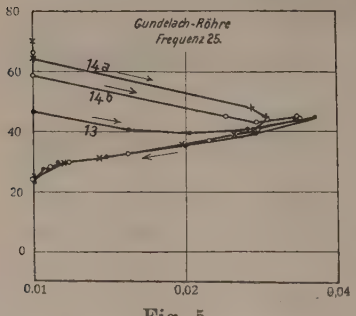



Fig. 5.

In Fig. 6 sind für dieselbe Gundelachröhre die statischen Charakteristiken angegeben. Die eine ist am 10. Februar, die andere am 6. März aufgenommen. Sie zeigen beide, was auch

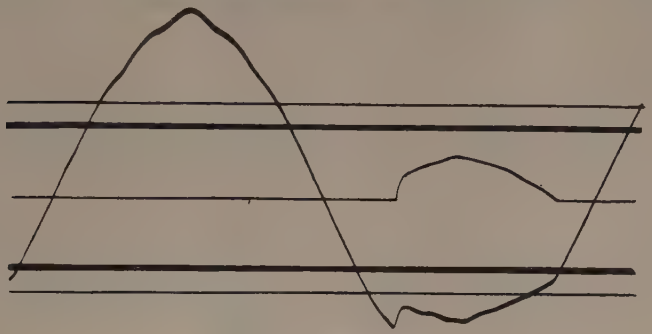


Fig. 5a, Aufnahme 13.

schon Marsh[1]) gelegentlich beobachtete, daß auch die statische Charakteristik bei wachsender Stromstärke auf höheren Spannungswerten verläuft als bei sinkender. Das dürfte wohl mit

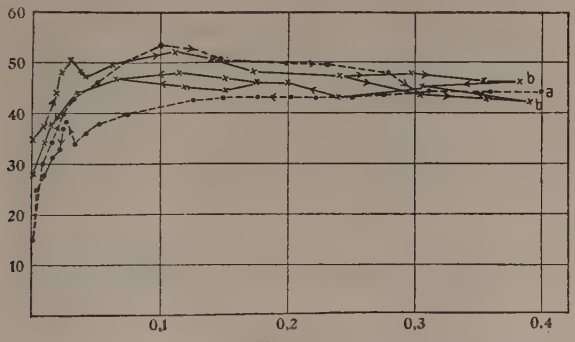



Fig. 6.

**Statistische Charakteristiken der Gundelachröhre.**
**Kurve *a* aufgenommen 10. II. 11. Kurve *b* aufgenommen 6. III. 11.**

der Abgabe von Gasen aus der Kathode zusammenhängen, die bei der langen Versuchsdauer nicht zu vermeiden ist. Ferner zeigt die im März aufgenommene Kurve, daß sich

1) S. Marsh, l. c.

inzwischen die Zustände in der Röhre wesentlich geändert haben müssen. Während der Beobachtungen für Kurve b, Fig. 6, schwankte in der Gegend des maximalen Stromes die Spannung zwischen zwei Werten hin und her. Bei den höheren Spannungen trat seitlich an der Anode ein halbkugelförmiges Glimmlicht auf. Die Spannung sprang auf den niedrigen Wert, wenn das Glimmlicht verschwand. Gleichzeitig erschien ein helles Licht an der Spitze der Anode. Die Entladung fand abwechselnd bei diesen beiden Zuständen statt. Hiermit dürfte wohl auch der bei Kurve 8 der Fig. 4 beobachtete anomale Verlauf der Hysteresisschleife im Zusammenhang stehen, da auch in diesem Falle das Auftreten eines analogen Glimmlichtes an der Anode beobachtet wurde.

Die statischen Spannungen wachsen bis zu einer bestimmten Stromstärke und nehmen dann wieder ab. Die dynamischen Kurven der Fig. 4 steigen im gleichen Falle fortdauernd. Das dürfte damit zusammenhängen, daß im statischen Falle mit zunehmender Stromstärke die Temperatur erhöht wird, während bei den schnell ablaufenden dynamischen Vorgängen eine konstante mittlere Temperatur festgehalten wird. Die bei den statischen Kurven beobachtete Hysteresis steht vermutlich in keinem Zusammenhange mit der bei den dynamischen beobachteten. Jedenfalls darf bei den dynamischen Kurven das Austreten von Gas nicht für die auftretende Hysteresis verantwortlich gemacht werden.

### C. Endgültige Versuche mit einer speziellen Röhre.

Um die Versuche unter besser definierten experimentellen Bedingungen durchführen zu können, wurde nunmehr eine Röhre hergestellt, die der Gundelachröhre ganz ähnlich war, die aber gestattete, einmal durch Rohransätze die Gasfüllung und den Gasdruck zu variieren und dann durch einen Schliff die Oxydkathode, wenn es nötig war, zu erneuern. Fig. 7 zeigt die Anordnung. *O* ist die Oxydkathode. Die Dimensionen des Kathodenbleches waren $1{,}5 \times 0{,}25 \times 0{,}0015$ cm. Die Oxydschicht wurde aus einer Lösung von Mercks „Puris-

simum“ Calciumnitrat in Wasser hergestellt, indem die Lösung mittels eines Platindrahtes auf das heiße Blech in freier Luft gestrichen wurde. Bei der hohen Temperatur geht das Nitrat in das Oxyd über. $A$ ist die Eisenanode; $S$ der mit Quecksilber abgedichtete Schliff. Bei den ersten Versuchen war die Manometerverbindung bei $M'$ und die Röhre war bei $M''$ geschlossen. Später, nach der Aufnahme 160, wurde die Manometerverbindung bei $M''$ angebracht. Als es sich bei weiteren Versuchen empfahl, zwischen die Quecksilberpumpe und die Röhre ein Kühlgefäß $K$ einzuschalten, um den Quecksilberdampf von der Röhre fernzuhalten, wurde das Manometer bei $M'''$ angesetzt, während $M''$ benutzt wurde, um verschiedene Gase einfüllen zu können. Bei den Versuchen unter Ausschaltung von Quecksilberdampf wurde das Kühlgefäß in eine Dewarflasche gesetzt, die eine Mischung von Kohlensäureschnee und Äther enthielt. Die dynamischen Charakteristiken dieser Röhre wurden untersucht in Abhängigkeit von der Variation 1. des Maximalstromes, 2. der Kathodentemperatur, 3. des Druckes, 4. der Gasfüllung, 5. der Frequenz. Ferner wurden Versuche gemacht mit Quecksilberdampf in der Röhre und unter Ausschaltung von Quecksilberdampf.

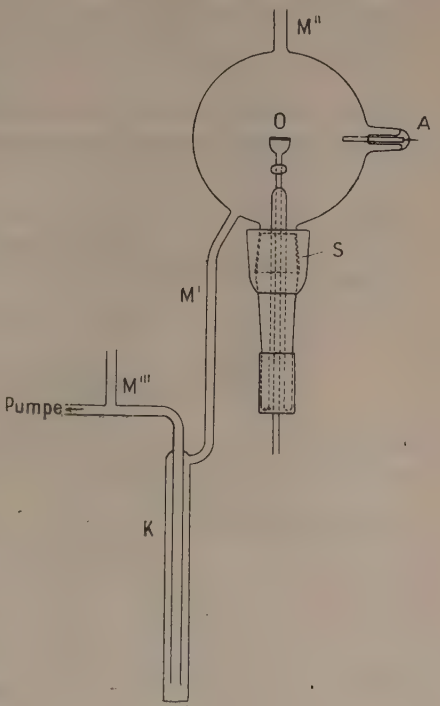


Fig. 7.

**1. Charakteristiken der speziellen Röhre bei Anwesenheit von Quecksilberdampf.**

a) Verschiedene Betriebsspannungen.

Fig. 8 stellt die Charakteristiken dar für verschiedene Maximalspannungen mit einem Drucke von 0,0015 mm und einer Elektrodentemperatur von 1190°. Man sieht, daß der

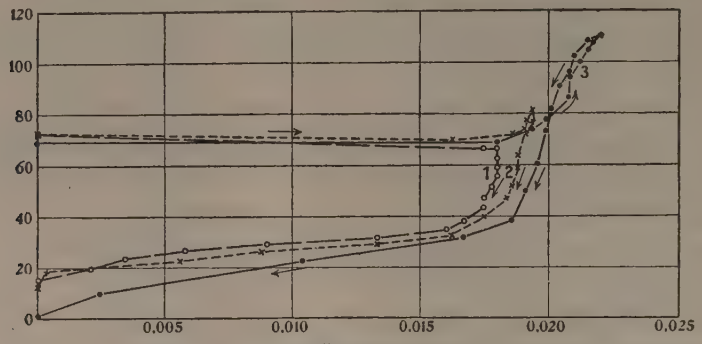



Fig. 8.
**Spannung variiert durch Abzweigung.**

Strom bei allen Kurven beinahe mit derselben Spannung von 70 Volt einsetzt, daß bei ca. 0,020 Amp. die Kurven zu

• 144 (1) Temp. 1223° ○ 144 (2) △ 144 (3) × 144 (4) Temp. 1231°
**Heizstrom 9,5 Amp.**

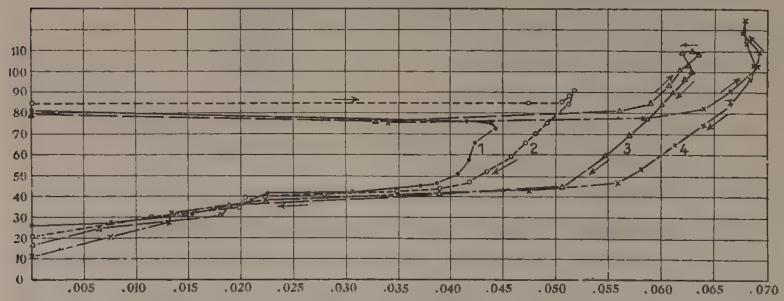



Fig. 9.

einer Grenzstromstärke umbiegen, daß sie je nach der angelegten Spannung früher oder später umkehren und nun mit abnehmendem Strom bei erheblich tieferen Spannungswerten auf den Nullpunkt zurückkehren.

Fig. 9 zeigt nach den Aufnahmen 144 dasselbe bei den Kurven 1, 2, 3 für eine Temperatur von 1220°, bei der Kurve 4 für eine Temperatur von 1230°. Der Typus der erhaltenen Kurven ist genau derselbe wie bei der Fig. 7, nur erscheint entsprechend der höheren Temperatur die Grenzstromstärke auf etwa 0,06 Amp. bzw. 0,07 Amp. hinaufgerückt. Bei noch höherer Glühtemperatur von etwa 1300° wird der Grenzstrom so hoch hinaufgerückt, daß er nicht mehr erreicht wird, ohne die Kathode zu gefährden.

Während bei Figg. 8 und 9 die Spannung dadurch variiert wurde, daß man durch Verschieben des Schleifkontaktes *A* in der Fig. 3 die Abzweigspannung veränderte, wurde bei Aufnahme 148, Fig. 10, die Spannung durch Erregung des Gene-

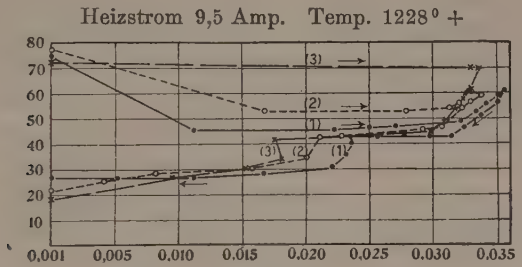



Fig. 10.

Spannung an der Maschine variiert.

rators variiert, und stets ein solcher Vorschaltwiderstand in den Entladungskreis eingeschaltet, daß dieselbe Maximalstromstärke erzielt wurde. Bei Kurve 3 war gar kein Vorschaltwiderstand eingeschaltet; der Strom setzt genau bei der Maximalspannung ein. Bei Kurve 2 war die Maschinenspannung erhöht und etwas Vorschaltwiderstand eingeschaltet; der Strom setzt schon vor Erreichung des Spannungsmaximums der Maschine ein und bleibt länger bestehen wie im Falle der Kurve 3. Noch höher war die Maschinenspannung und Vorschaltwiderstand bei Kurve 1, wo der Strom noch früher einsetzte und länger andauerte, wie in den beiden anderen Fällen. Der Strom setzte in allen drei Fällen wiederum bei

fast derselben Spannung ein, im Falle 3 bleibt sie bis zur Erreichung des Maximalstromes auf demselben Werte, im Falle 2 sinkt sie alsbald, nachdem der Strom einsetzt, auf einen tieferen Wert; im Falle 1 auf einen noch tieferen Betrag. In dem dem abnehmenden Strom entsprechenden Aste der Kurven tritt in allen drei Fällen ein Wendepunkt auf, der auf eine an dieser Stelle einsetzende Änderung der physikalischen Umstände der Entladung hindeutet. Im Falle der Kurve 3 wächst sogar der Strom zunächst wieder ein wenig, um dann erst auf den Nullwert herunterzugehen.

### b) Aufnahmen mit kontinuierlicher Variation der Versuchsbedingungen.

Die im vorigen Abschnitt mitgeteilten Versuche hatten gelehrt, daß es unmöglich war, den übrigen Zustand der Röhre so lange genau konstant zu halten, als es die Aufnahme der Charakteristiken bei der Variation einer einzigen Zustandsgröße verlangte. Darum wurden weiterhin alle Beobachtungen so gemacht, daß man eine von den Zustandsgrößen schnell veränderte und durch kontinuierliche Registrierung der Strom- und Spannungskurven den Einfluß dieser Veränderung auf die Charakteristik beobachtete. Man konnte dann sicher sein, daß alle übrigen Zustandsgrößen, die Kathodentemperatur in einigen Fällen ausgenommen, während der Registrierzeit keine wesentliche Veränderung erfahren hatten, namentlich da die Dauer einer solchen Registrierung meist nicht mehr als zwei Sekunden betrug. Zu Beginn jeder Aufnahme wurde der Vorschaltwiderstand, die angelegte Spannung, die Temperatur und der Gasdruck immer wieder auf denselben Wert gebracht und nun eine dieser vier Variabeln stetig variiert. Die Registrierung erfolgte auf langen Streifen photographischen Papiers. Der Apparat, der es ermöglicht, die Registrierung durchzuführen, ist von dem Institutsmechaniker Müller konstruiert und von A. H. Taylor[1]) beschrieben worden. Die Ausgangswerte, wenn nicht anders von den Kurven angegeben, sind:

1) A. H. Taylor, Dissertation. Göttingen 1909.

| | |
|---|---|
| Druck . . . . . | 0,0015—0,0022 mm |
| Temperatur der Kathode | 1336—1346° |
| $R_1$ (Fig. 3) . . . . . | 0 Ohm |
| $R_2$ . . . . . | 100 „ |
| $R_3$ . . . . . | ca. 360 „ |
| $E$ . . . . . | 220 Volt. |

**Ergebnisse.**

$\alpha$) Aufnahme 173. Heizstrom, Druck, Maschinenspannung, Vorschaltwiderstand konstant. Spannung durch Verschiebung des Kontaktes $A$, Fig. 3, variiert. Durch Verschiebung des Kontaktes $A$ wurde der Widerstand $R_1$ von Null bis 100 Ohm vergrößert und dann wieder auf Null gebracht. Figg. 11a, 11b, 11c zeigen die entsprechenden Charakteristiken. Die Nummern bedeuten die Perioden, die zur Auswertung ausgewählt worden sind. Man sieht, daß vor allen Dingen die Zündspannung absolut konstant bleibt und 75 Volt beträgt. Mit abnehmender Spannung ziehen sich die Schleifen in sich zusammen. Wird nach der Periode 27 die Spannung wieder vergrößert, so schieben sich die Schleifen zungenförmig vor, wobei gleichzeitig die Neigung mit zunehmender Maximalstromstärke kleiner wird. Diese Neigungsänderung mit wachsender Stromstärke dürfte wohl wieder damit zusammenhängen, daß sich die Temperatur durch die Überlagerung des Entladungstromes erhöht. Es zeigt sich hier dasselbe, was bei Fig. 9 eintrat. Wenn die erhöhte Temperatur einmal erreicht ist, bleibt sie auch bei abnehmender Maximalstromstärke noch nachwirkend erhalten; denn, wie die Charakteristiken für Perioden 8—20 gezeigt haben, bleibt in diesem Falle die Neigung der Kurven dieselbe.

$\beta$) Aufnahme 176, Figg. 12a, 12b. Heizstrom, Druck und Abzweigspannung konstant. Vorschaltwiderstand variiert. $R_3$, Fig. 3, wurde erst allmählich auf 2700 Ohm vergrößert, auf unendlich gebracht, und gleich darauf das Verfahren umgekehrt. Es zeigen sich ganz analoge Verhältnisse wie bei Aufnahme 173. Bei abnehmender Maximalstromstärke in den Perioden 12—37 ziehen sich die Schleifen zunächst bei konstant gehaltener Neigung in sich selbst zurück.

Angelegte Spannung durch Variation des Abzweigungswiderstandes verkleinert.

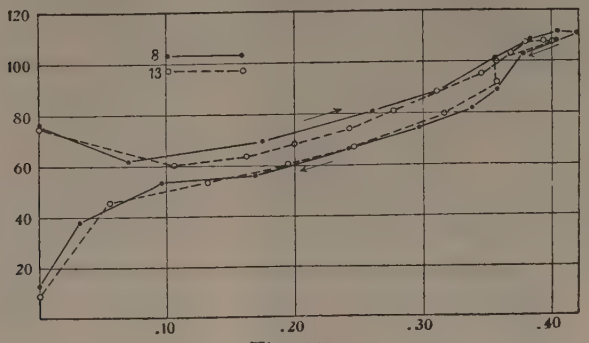



Fig. 11a.

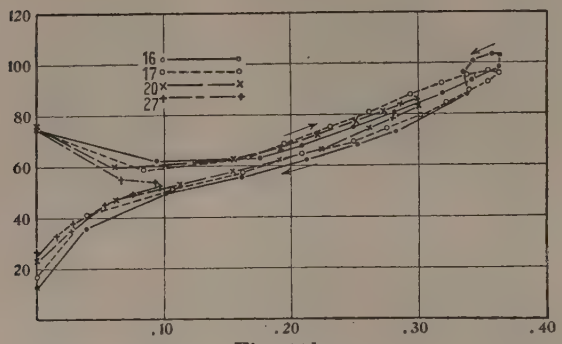



Fig. 11b.

Angelegte Spannung durch Abzweigung vergrößert.

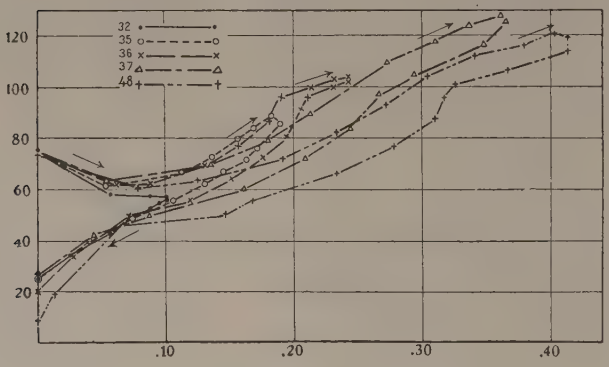



Fig. 11c.

Von Periode 38 ab wird die Neigung steiler, bei wieder zunehmender Maximalstromstärke wachsen die Zungen wieder vor unter gleichzeitiger Verringerung ihrer Neigung. Nachdem die schließlich festgehaltene Maximalstromstärke längere Zeit bestanden hat, wird mit Periode 77 wieder genau dieselbe

Vorschaltwiderstand vergrößert.

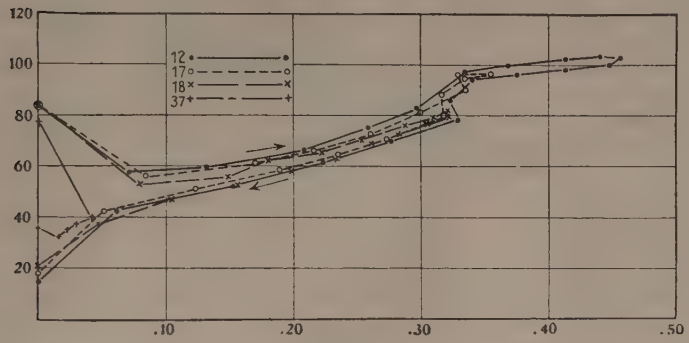



Fig. 12a.

Vorschaltwiderstand verkleinert.

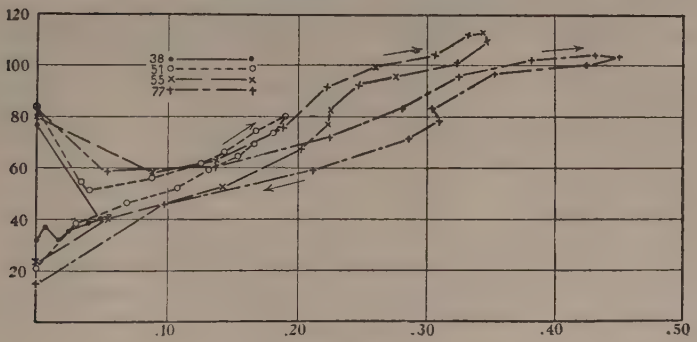



Fig. 12b.

Charakteristik gefunden wie bei der Ausgangsperiode 12. Die Zündspannung war bei diesen Aufnahmen, abgesehen von den ganz kleinen Maximalstromstärken entsprechenden Perioden 37, 38, wiederum konstant, etwa 82 Volt.

γ) Aufnahmen 174, Figg. 13a, 13b. Druck, Maschinenspannung, Abzweigwiderstand, Vorschaltwider-

stand konstant. Kathodentemperatur variiert. Der Heizstrom wurde von 9,25 Amp. bis 7,1 Amp. stetig verkleinert, dann wieder auf 9,25 Amp. vergrößert. Bei einem Heizstrom von 7,1 Amp. war die Kathodentemperatur 1070°, falls keine

Heizstrom verändert (verkleinert dann vergrößert; siehe auch 13b).

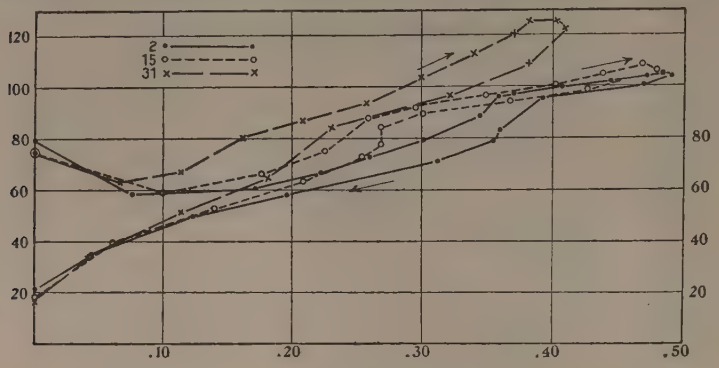



Fig. 13a.

Heizstrom verändert.

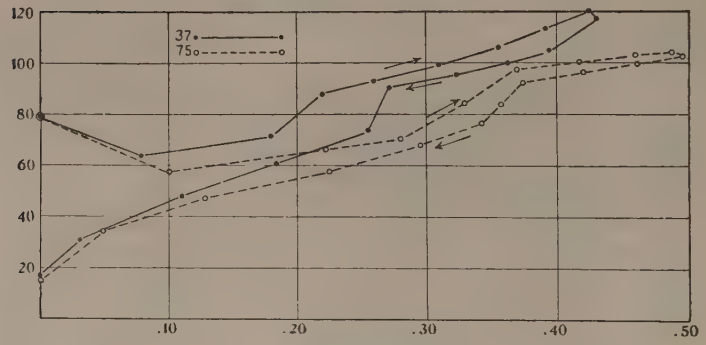



Fig. 13b.

Entladung durch die Röhre ging. Wenn die Entladung durch die Röhre ging, ließ sich die Temperatur in diesem Falle nicht messen, weil sich ein Lichtbogen ausbildete. Bei 9,25 Amp. war die Temperatur rund 1340°. Aufnahme 174 wurde bei den normalen Ausgangsbedingungen gemacht. Eine Aufnahme bei kleinen maximalen Stromstärken zeigt, daß auch hier die Zündspannung unabhängig von der veränderlichen

Druck vergrößert.

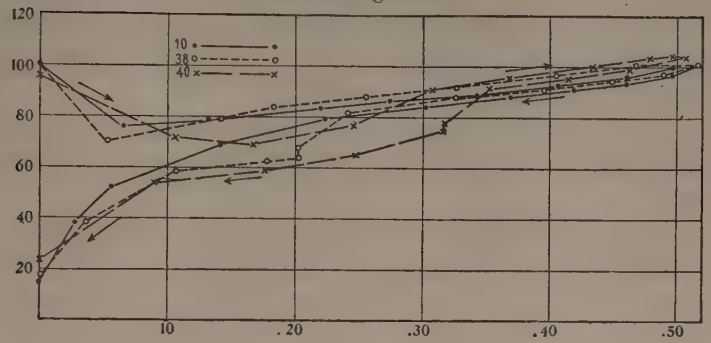



Fig. 14a.

Druck vergrößert.

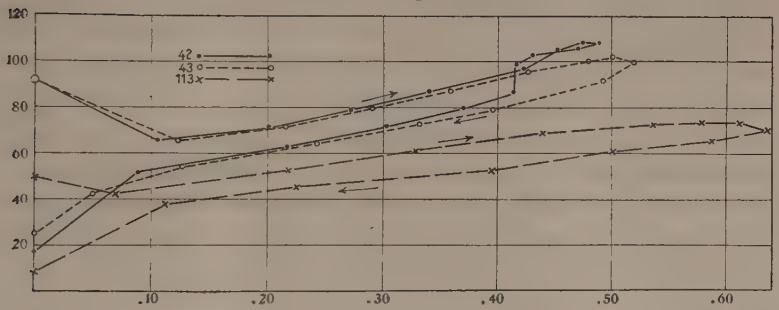



Fig. 14b.

Aufnahme 180. Druck vergrößert, 0,0015—0,095 mm.

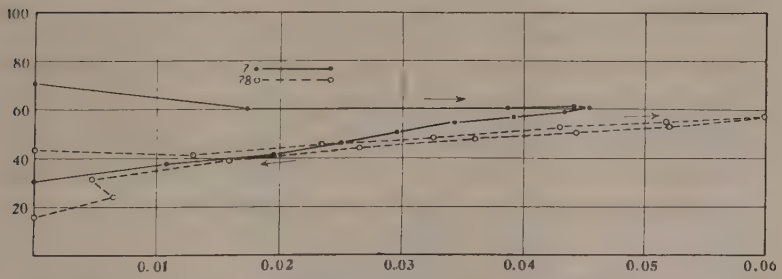



Fig. 14c.

Temperatur dieselbe bleibt. Mit abnehmender Temperatur wird die Neigung der Schleifen steiler. Auf den allgemeinen Verlauf der Hysteresisschleife scheint die Temperaturänderung keinen erheblichen Einfluß auszuüben.

In allen bisher mitgeteilten Kurven zeigt sich auf dem abnehmendem Aste der schon bei Fig. 10 erwähnte Wendepunkt.

*δ*) Aufnahmen 178 und 180, Fig. 14a, 14b, 14c. Heizstrom, Abzweigspannung, Vorschaltwiderstand konstant. Druck variiert. Es wurde bei einem möglichst niedrigen Druck angefangen und dann durch Einlassen von Luft in die Röhre der Druck erhöht. Der Ausgangspunkt für die Aufnahme 178 war der am Anfang gegebene; für Aufnahme 180 wurde die Maximalstromstärke durch Verkleinerung der Abzweigspannung und Vergrößerung des Vorschaltwiderstandes verkleinert. Am Ende der Aufnahme 178 war der Druck 0,041 mm, nach Aufnahme 180 war er 0,095 mm. Man sieht, daß sich der allgemeine Charakter der Schleifen durch die Druckänderung nur insofern ändert, als mit zunehmendem Drucke der Wendepunkt zunächst stärker hervortritt, zu immer höherer Stromstärke hinaufrückt und schließlich ganz verschwindet. Die Zündspannung nimmt mit zunehmendem Drucke von etwa 100 Volt beginnend bis auf 50 Volt ab. Gleichzeitig wird die Neigung der Kurven immer geringer, was wohl wieder mit der Erhöhung der Maximalstromstärke zusammenhängen wird. Aufnahme 180 zeigt dasselbe für einen Betrieb mit erheblich kleinerer Maximalstromstärke.

*ε*) Aufnahmen 218, 219, 220, 224, 225, 226 sind gemacht bei zwei Maximalstromstärken und beinahe konstant gehaltener Kathodentemperatur von ca. 1300°, um den Einfluß der wechselnden Frequenz bei verschiedenen Drucken zu untersuchen. Für konstante Maximalstromstärke sind die Charakteristiken für drei Drucke und Frequenzen 55 und 200 in Figg. 15a, 15b, 15c gegeben. Figg. 16a, 16b, 16c stellen ähnliche Kurven für größere Stromstärken dar. Man sieht aus diesen Kurven: falls in jeder Periode der Strom gezündet

Temperatur der Kathode 1306°.
• 218 (1) Frequenz 55. Druck 0,003.
× 218 (2) „ 200. „ 0,003.

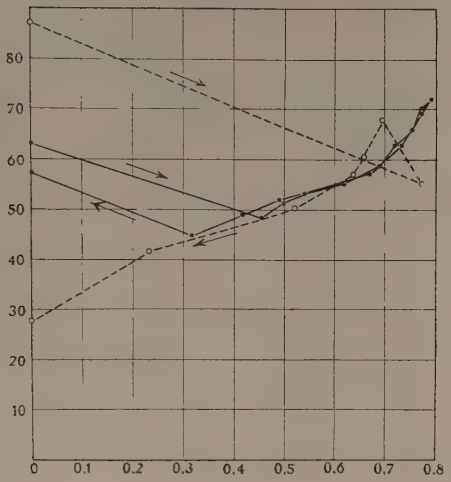



Fig. 15a.

Temperatur der Kathode 1306°.
• 219 (1) Frequenz 55. Druck 0,016.
○ 219 (2) „ 200. „ 0,016.

Temperatur der Kathode 1306°.
• 220 (1) Frequenz 55. Druck 0,110.
○ 220 (2) „ 200. „ 0,113.

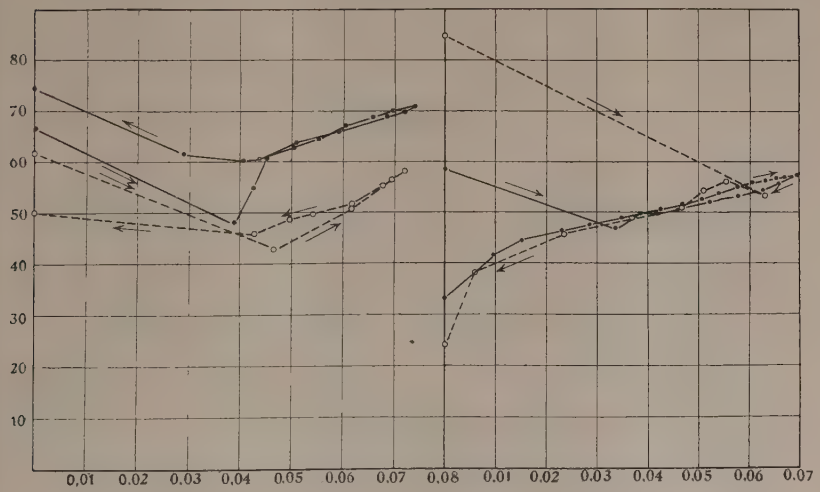



Fig. 15b. Fig. 15c.

• 224 (1) Druck 0,005. Frequenz 55. Temp. 1336.
○ 224 (2) „ 0,005. „ 200.

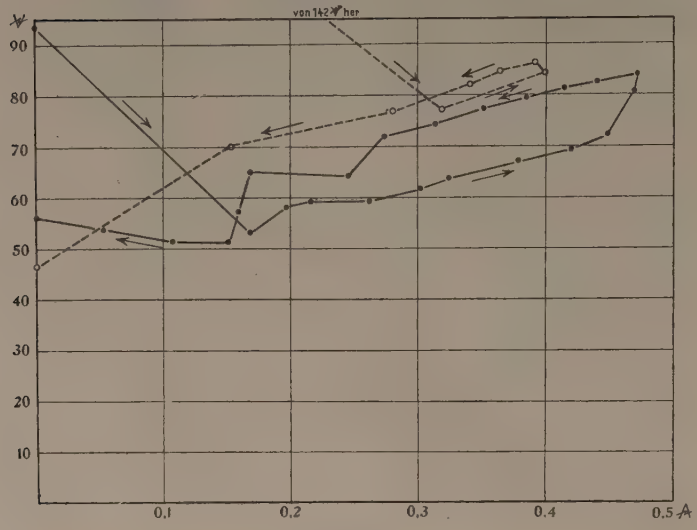



Fig. 16a.

• 225 Druck 0,017. Frequenz 55. Temp. 1336.
○ „ 0,017. „ 200.

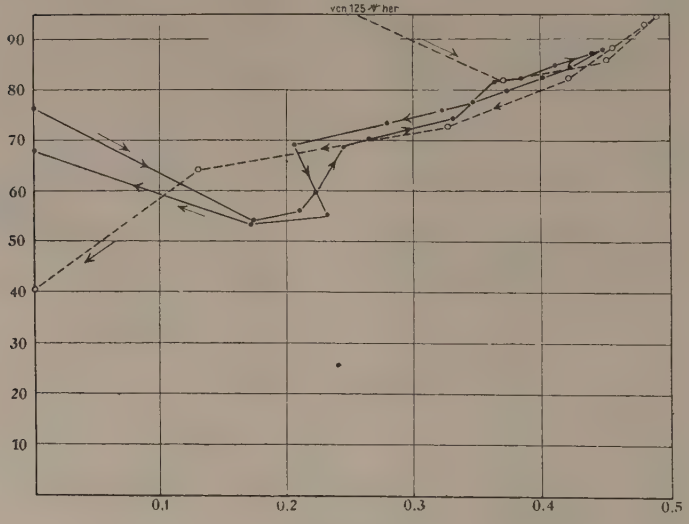



Fig. 16b.

wird, ist die Zündspannung bei der hohen Frequenz stets erheblich größer als bei der Frequenz 55. Im Falle der Aufnahme 219, die bei kleiner Maximalstromstärke aufgenommen wurde, zündete die niedrigere Frequenz bei einer niedrigeren Spannung wie die höhere. In diesem Falle wurde bei der höheren Frequenz jedoch der Strom nicht in jeder Periode gezündet. Man kann annehmen, daß sich hier die Ionisierungen

**Aufnahmen 226. • Druck 0,054. Frequenz 55. Temp. 1306.**
**○ „ 0,054. „ 220.**

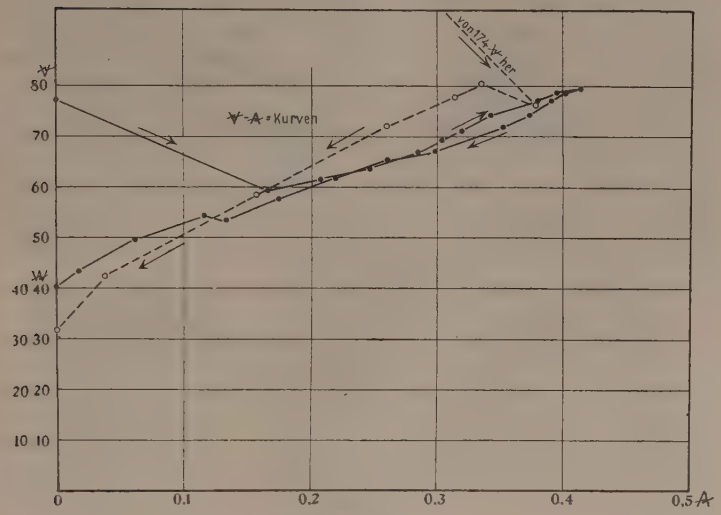



Fig. 16 c.

mehrerer Perioden summieren müssen, ehe eine Zündung zustande kommt. So würde man dieses anomale Verhalten begreifen können. Die mit großen Stromstärken aufgenommenen Kurven 224, 225, 226, Figg. 16 a, 16 b, 16 c, sind nicht wesentlich anders. Der Einfluß der Frequenz bei einer Temperatur von 1225° ist genau derselbe. Bei den niedrigeren Drucken zeigt sich in demselben Falle eine Neigung zu einer Grenzstromstärke; mit zunehmendem Druck tritt diese Neigung, vielleicht wegen der erhöhten Temperatur an einem Punkte des Kathodenbleches, zurück.

### c) Statische Charakteristiken.

Statische Charakteristiken der benutzten Röhre sind in Fig. 17 für verschiedene Drucke und Temperaturen dargestellt. Der erste Ast der Kurven bis zum Punkte *a* wurde mit einem hochempfindlichen Galvanometer aufgenommen, die bei höheren

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| • | (1) | Druck | 0,0009. | Heizstrom | 9,5 Amp. | Temp. 1230°. |
| × | (2) | „ | 0,0009. | „ | 8,7 „ | „ 1140°. |
| ○ | (3) | „ | 0,039—0,025. | „ | 8,7 „ | „ 1140°. |
| △ | (4) | „ | 0,038—0,038. | „ | 9,5 „ | „ 1230°. |
| □ | (5) | „ | 0,008—0,006. | „ | 9,5 „ | „ 1230°. |
| ⊤ | (6) | „ | 0,006—0,003. | „ | 8,7 „ | „ 1140°. |

Für Kurven von 0 bis Punkte *a*, 1 cm auf der Abszissenachse $= 10^{-7}$ Amp.
„ „ „ Punkt *b* an, 1 cm „ „ „ $= 10^{-3}$ „

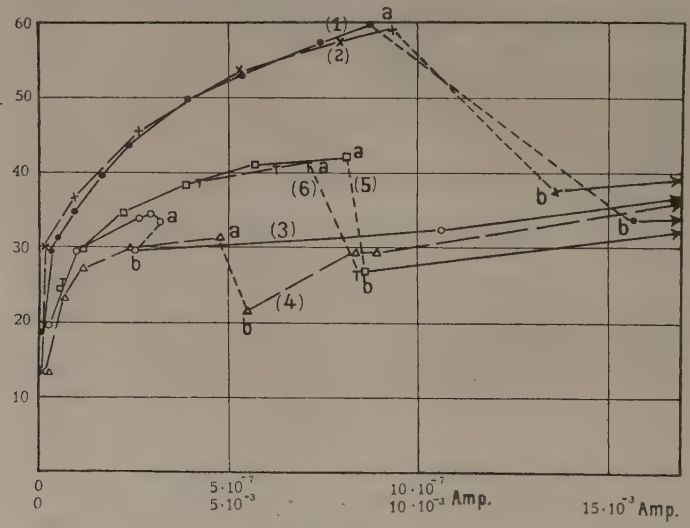



Fig. 17.

Stromstärken von Punkt *b* ab mit einem Amperemeter. Der Stromstärkemaßstab des ersten Teils der Kurven ist ein anderer wie der des zweiten Teils. Man sieht, daß beim Punkte *a* ein Sprung in der Stromstärke zum Punkte *b* stattfindet. Die Spannung, bei der dieser Sprung von *a* aus stattfindet, ist um so höher, je niedriger der Druck ist. Gleichzeitig mit dem Auftreten dieses Sprunges fängt das Gas in der Röhre an zu

leuchten. Dieser Befund steht durchaus im Einklang mit dem, was sich an den dynamischen Charakteristiken gezeigt hat. Da der Oszillograph nicht imstande ist, den Verlauf des ersten Kurvenastes bis Punkt *a* zu registrieren, entspricht das, was wir bei den dynamischen Kurven mit Zündspannung bezeichnet haben, dem Punkte *a*. Die Zündspannung also ist offenbar diejenige Spannung, bei der die Stoßionisation einsetzt. Wie bei den dynamischen Kurven sinkt die zum Punkte *a* gehörige Spannung mit zunehmendem Drucke.

### d) Unterbrechung des Stromes bei tiefem Drucke.

Bei sehr tiefem Drucke wurde zuweilen beobachtet, daß der Strom nach dem Entstehen von selber wieder verschwand, um dann plötzlich wieder einzusetzen. Das wurde beobachtet, nachdem die Röhre ca. 20 Stunden in Betrieb gewesen war. Nachher aber wiederholte es sich auch bei einer neuen Kathodenschicht, wenn nur der Druck tief genug war. Um einen näheren

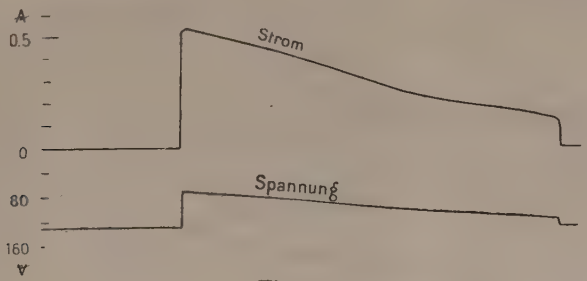



Fig. 18.

Einblick zu gewinnen, wurde an diese Röhre eine Gleichspannung von 130 Volt angelegt. Dann entstand beim ersten Einschalten der Spannung ein Strom, nahm allmählich ab und verschwand, dann setzte er ungefähr alle 30 Sekunden wieder ein. Wurde der Vorschaltwiderstand verkleinert, so wurde die Dauer der Stromunterbrechung immer kürzer. Auch von Marsh[1]) wurde diese Erscheinung bei Gleichspannung

1) S. Marsh, l. c.

bereits beobachtet. Der von mir oszillographisch aufgenommene Spannungs- und Stromverlauf ist in Fig. 18 wiedergegeben.

**2. Die Charakteristiken bei Ausschluß von Quecksilberdampf.**

Die Versuche wurden jetzt in derselben Weise wiederholt, während durch das Kühlgefäß der Quecksilberdampf

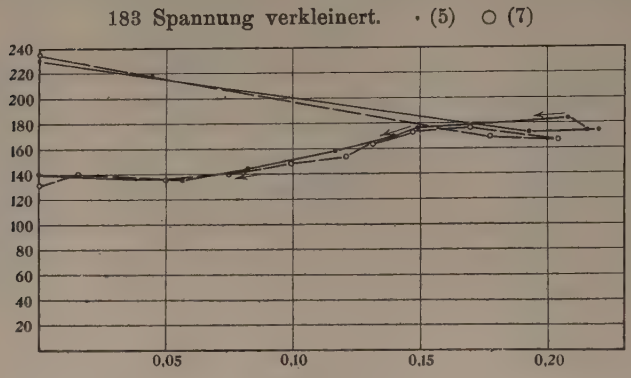



Fig. 18a.

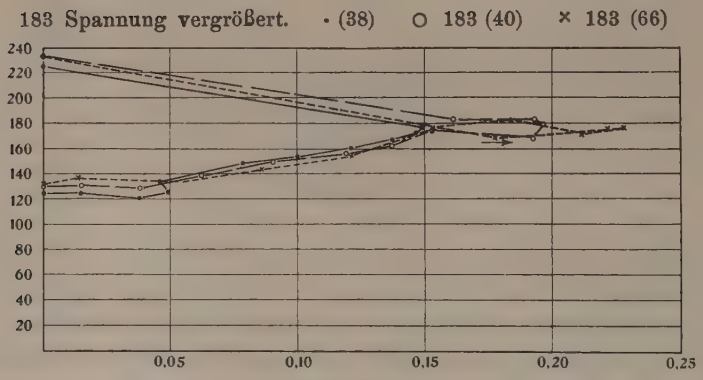



Fig. 18b.

aus der Röhre ferngehalten wurde. Die Ausgangsbedingungen waren nahezu dieselben, wie die bei den Aufnahmen 173 bis 180.

*α*) Aufnahme 183, Figg. 18a, 18b. Heizstrom, Maschinenspannung, Vorschaltwiderstand, Druck konstant. Spannung durch Verschiebung des Kontaktes *A*, Fig. 3, variiert. Die Kurve des Verhaltens ist qualitativ dieselbe wie im früheren Falle. Nur ist die Zündspitze 240 Volt, d. h. 3—4mal so groß wie früher. Weil die

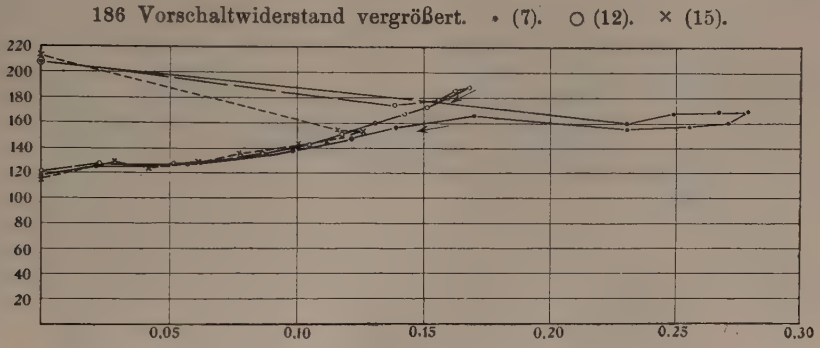



Fig. 19a.

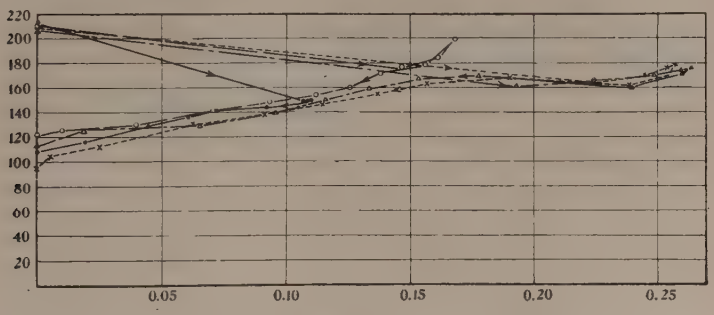



Fig. 19b.

Entladungsspannung so hoch ist, kommt die Zündung bei der zur Verfügung stehenden elektromotorischen Kraft immer sehr nahe der Maximalspannung zustande. Übrigens zeigt sich bei abnehmender Spannung ebenso wie bei wachsender eine Unstetigkeit, die wiederum auf eine Veränderung der Entladungsform an dieser Stelle hindeutet. An den Kurven äußert sich das durch die an dem Ende eintretende Schleife,

die in umgekehrtem Sinne durchlaufen wird wie die Kurven sonst.

*β*) Aufnahme, 186 Figg. 19a, 19b. Heizstrom, Druck, Abzweigspannung konstant. Vorschaltwiderstand variiert. Bei Vergrößerung des Vorschaltwiderstandes verändert sich die Maximalstromstärke sehr langsam, bis ein be-

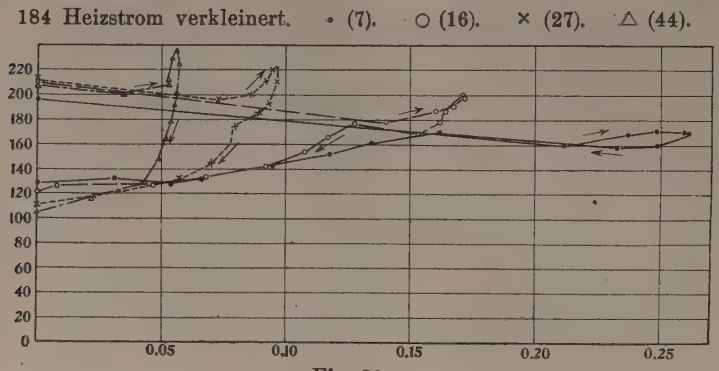



Fig. 20a.

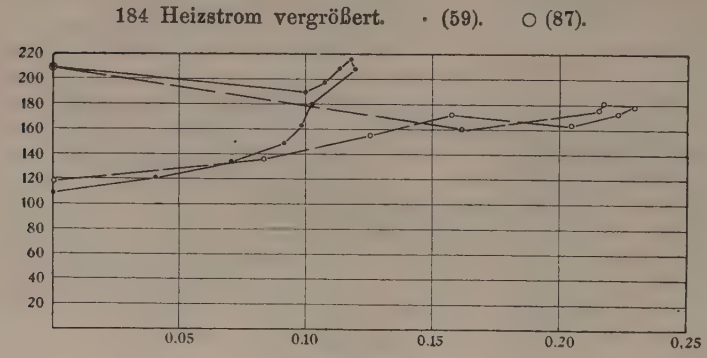



Fig. 20b.

stimmter Wert erreicht wird, von dem aus er plötzlich auf etwa die Hälfte heruntergeht. Gleichzeitig geht die Spannung in die Höhe. Mit zunehmendem Vorschaltwiderstande wird der Zeitpunkt des Zündens immer näher an die Maximalspannung herangerückt, ohne daß jedoch der Maximalstrom wesentlich verändert wurde. Schließlich findet die Zündung

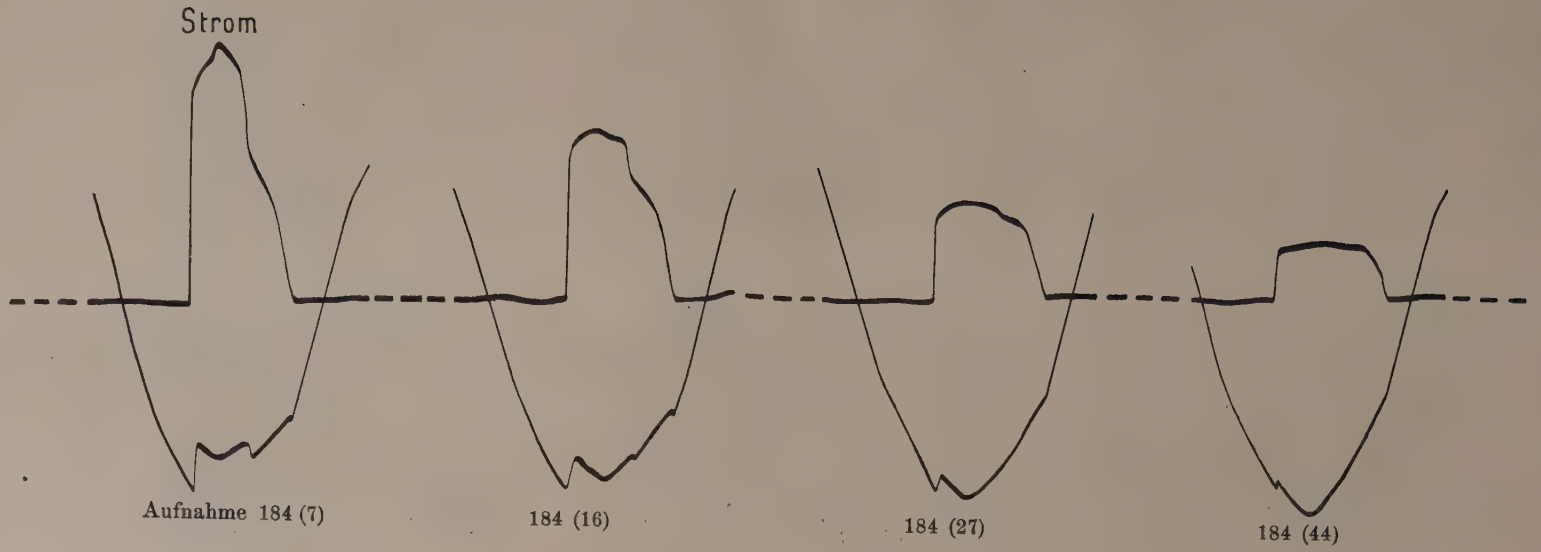



Fig. 20c.

Änderung des Strom- und Spannungsverlaufs bei Verkleinerung der Kathodentemperatur.

genau in dem Zeitpunkte statt, wo die Spannung ihr Maximum erreicht. Wird der Vorschaltwiderstand weiter vergrößert, so hört der Strom auf. Das Umgekehrte findet statt, wenn der Vorschaltwiderstand verkleinert wird.

$\gamma$) Aufnahme 184, Figg. 20a, 20b, 20c. Druck, Abzweigspannung, Vorschaltwiderstand konstant. Kathodentemperatur variiert. Bei diesen Aufnahmen ließ sich der Heizstrom so weit verkleinern, daß der Grenzstrom erreicht wurde, ohne daß ein Lichtbogen entstand. Mit zunehmender Temperatur rückt die Grenzstromstärke zu immer höheren Werten.

$\delta$) Aufnahme 187, Figg. 21a, 21b. Heizstrom, Abzweigspannung, Vorschaltwiderstand konstant. Druck variiert. Bei dieser Aufnahme wurde Luft durch die Pumpe

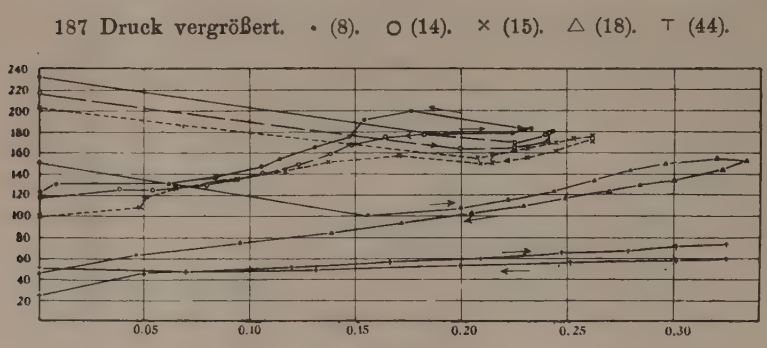



Fig. 21a.

in das Kühlgefäß hineingelassen und die Pumpe dann abgeschlossen. Nach 10 Minuten wurde der Hahn zwischen dem Kühlgefäß und der Röhre geöffnet und die Aufnahme gemacht, während die abgekühlte Luft in das Entladungsrohr einströmte. Der Druck stieg dabei von 0,002 mm auf etwa 0,05 mm. Während dieser Zeit fiel die Spannung auf ungefähr $^1/_4$ und die Maximalstromstärke nahm erheblich zu. Bei den tieferen Drucken hatten die Kurven Schleifen mit negativem Umlaufssinne. Mit zunehmendem Druck fielen diese Schleifen weg und der Umlaufssinn blieb dauernd positiv.

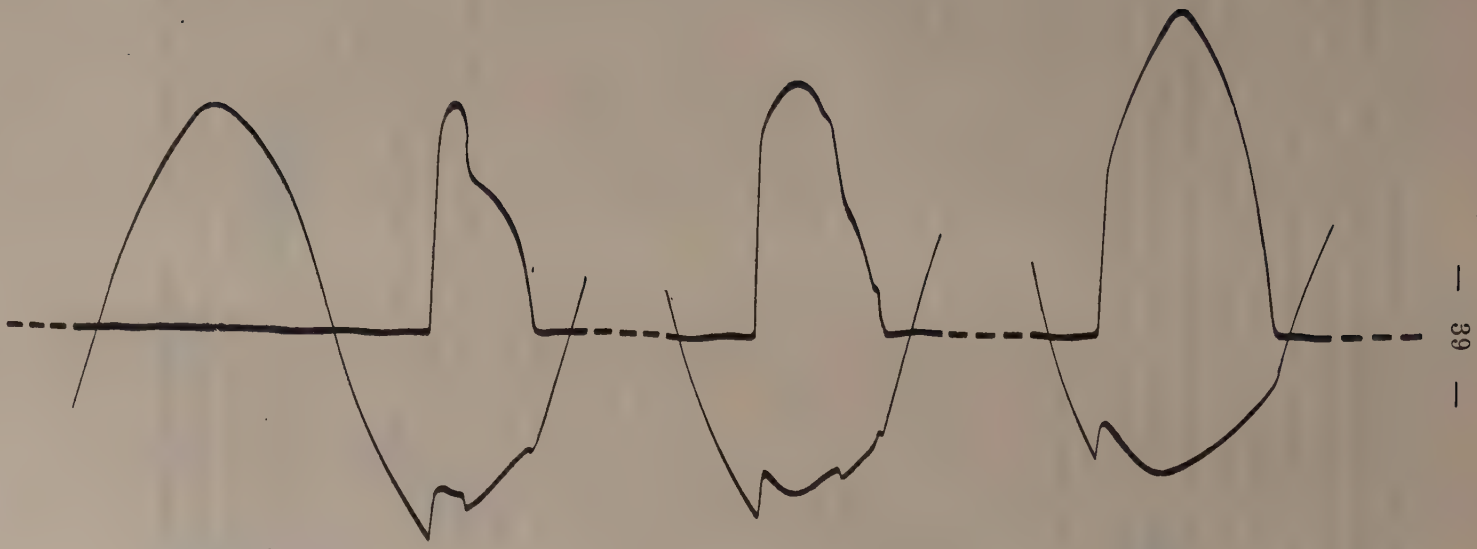





Fig. 21b.

Änderung des Strom- und Spannungsverlaufs bei Vergrößerung des Druckes.

Aufnahme 188 wurde gemacht, nachdem die Entladungsröhre $2^1/_2$ Stunden ohne Kühlung des Kühlgefäßes gestanden hatte. Die Charakteristiken zeigen, Fig. 22, daß nun die Röhre wieder in demselben Zustande war wie bei den Aufnahmen 173 bis 178.

Zusammenfassend ist zu sagen, daß durch den Ausschluß des Hg-Dampfes erstens die Zündspannung erheblich erhöht wurde; zweitens die Neigung der Grenzstromstärke zu erreichen vergrößert wurde. Hervorgehoben werden muß noch,

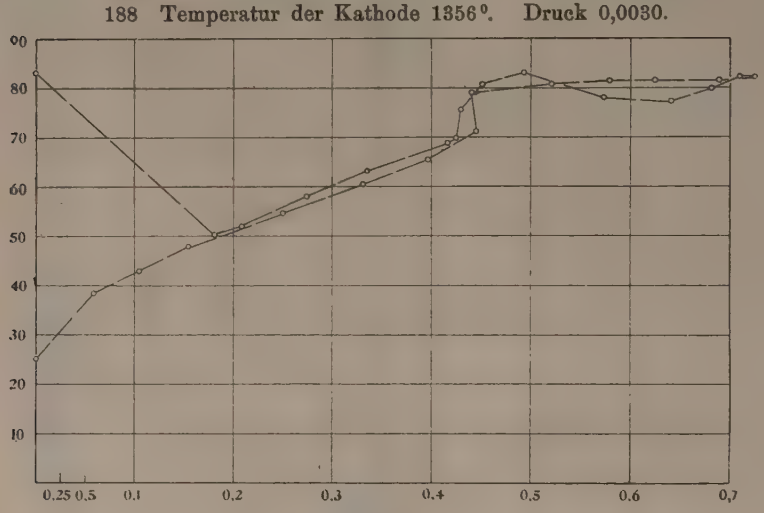



Fig. 22.

daß hier die schon bei dem Wendepunkt in den Aufnahmen 173—178 angedeutete Erscheinung in einem sehr viel stärkeren Maße zutage tritt. An den Oszillogrammen äußert es sich durch das Auftreten von einer sekundären Spitze in der Spannungswelle, wie das bei Figg. 20c, 21b angedeutet ist.

### 3. Charakteristiken bei Wasserstoffüllung.

Um nun weiter den Einfluß der Natur des Gases auf den Verlauf der Charakteristiken zu untersuchen, erhielt die Entladungsröhre eine Wasserstoffüllung. Oben an die Kugel

wurde eine Röhre angeblasen, *M″*, die den in einem Kipp-schen Generator erzeugten Wasserstoff in die Kugel einführte. Das Gas wurde in der üblichen Weise gereinigt (Waschflaschen mit destilliertem Wasser, Kaliumpermanganat und Schwefelsäure) und getrocknet (Chlorcalcium). Mittels eines nahe bei der Entladungskugel angebrachten Hahnes konnte die Verbindungsröhre abgeschlossen werden, wenn sie evakuiert werden sollte. Quecksilberdampf, der aus der Pumpe hätte eintreten können, wurde, wie früher, durch das Kühlgefäß ferngehalten. Das Verfahren bei der Füllung der Röhre mit Wasserstoff war folgendes:

Nachdem die Entladungsröhre bis auf einen Druck von ca. 1 cm evakuiert war, wurde sie mit Wasserstoff gefüllt. Dies wurde einmal wiederholt, dann die Röhre weiter evakuiert und der Entladungsstrom eine halbe Stunde hindurchgeschickt, wobei die Pumpe immer im Gange war. Nach Ablauf dieser Zeit betrug der Druck 0,003 mm. Wasserstoff wurde eingelassen und die Röhre wieder bis auf 0,003 mm evakuiert. Vor der Aufnahme 190 fand eine Wiederholung des Verfahrens statt.

Die Kurven jeder der folgenden vier Reihen sind nicht kontinuierlich, sondern so schnell nacheinander aufgenommen, daß der Zustand der Röhre nur wenig variieren konnte. Die Zündspannungen und die Druckmessungen zeigen allerdings, daß sich der Druck während der einzelnen Reihen etwas verändert hat. Denn frühere Beobachtungen haben gezeigt, daß die Zündspannung bei konstantem Druck konstant bleibt. Bei diesem Verfahren kann aber der Heizstrom nach dem Entladungsstrom reguliert werden, und zwar wurde bei diesen Aufnahmen die Kathodentemperatur möglichst konstant gehalten.

*α*) Aufnahme 191, Fig. 23. Kathodentemperatur, Maschinenspannung, Abzweigwiderstand, Druck konstant. Abzweigspannung durch Verschiebung des Kontaktes *A*, Fig. 3, variiert. Der allgemeine Charakter der Hysteresisschleifen ist derselbe wie bei Luftfüllung ohne Hg-Dampf, nur sind die Kurven nach kleineren Spannungen

heruntergerückt. Die Hysteresis ist für größeren Strom ein wenig negativ.

Wasserstoffüllung. Druck 0,003.
191 Abzweigwiderstand verändert. • 1. ○ 2. × 3.

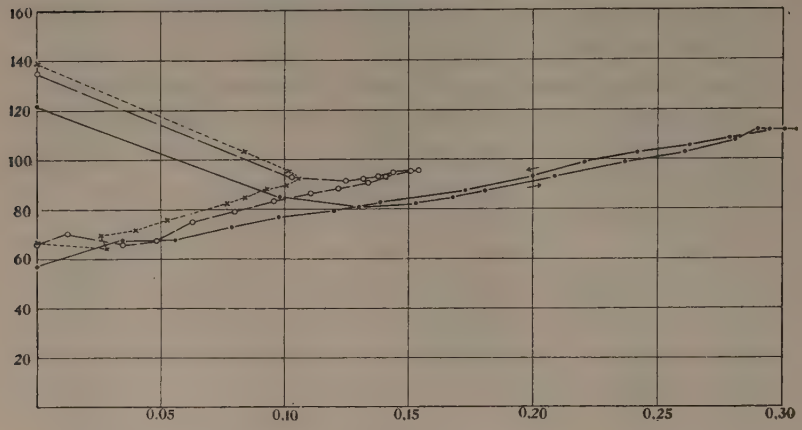



Fig. 23.

Wasserstoffüllung. Druck 0,0025.
192 Vorschaltwiderstand vergrößert, von 300 auf 1500 Ohm.
• 1. ○ 2. × 3. △ 5.

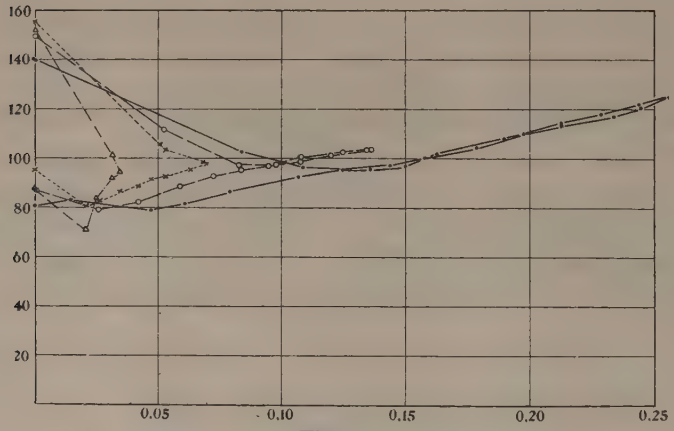



Fig. 24.

$\beta$) Aufnahme 192, Fig. 24. Kathodentemperatur, Abzweigspannung, Druck konstant. Vorschaltwider-

stand variiert. Die Kurven zeigen, daß, wie oben, die Hysteresis für größere Stromstärke negativ oder fast Null war; für kleinere Stromstärken ist sie positiv. Der Strom hörte auf mit einer konstanten Spannung, oder sogar mit einer Spitze in der Spannungswelle.

$\gamma$) Aufnahme 190, Fig. 25. Abzweigspannung, Vorschaltwiderstand, Druck konstant, Kathodentemperatur variiert. Von den normalen Ausgangsbedingungen

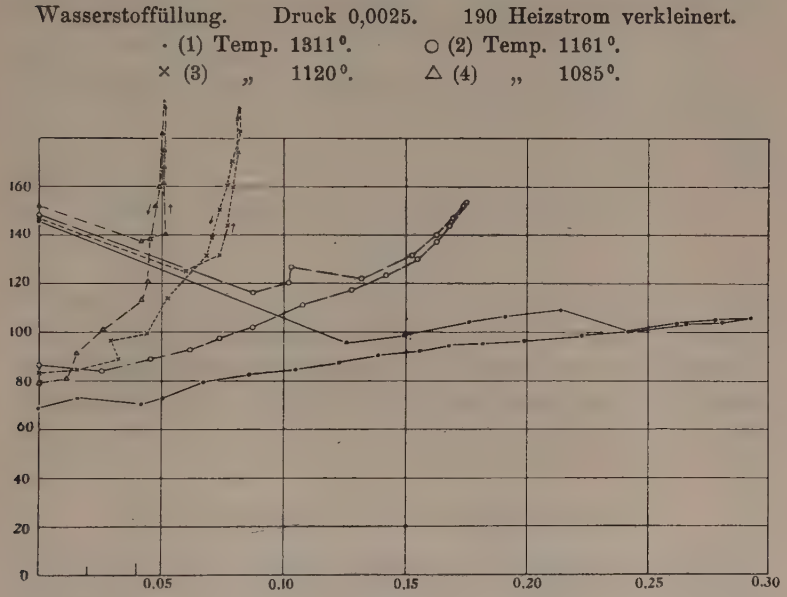



Fig. 25.

aus konnte der Heizstrom beliebig variiert werden, ohne das Kathodenblech durch den Entladungsstrom zu gefährden. Im Gegensatz zu dem Fall der Luftfüllung mit Hg-Dampf wurde bei Wasserstoffüllung die Erhitzung einzelner Stellen an das Kathodenblech und das Konzentrieren der Entladung auf diese Bereiche nicht beobachtet. Deshalb ist die Grenzstromstärke sehr scharf definiert, besonders bei niedrigen Temperaturen, was die Kurven deutlich zeigen.

δ) Aufnahme 193, Fig. 26. Kathodentemperatur, Abzweigspannung, Vorschaltwiderstand konstant. Druck variiert. Nach Aufnahme 192 wurde Wasserstoff in die Entladungsröhre eingelassen. Die drei Kurven der Fig. 26

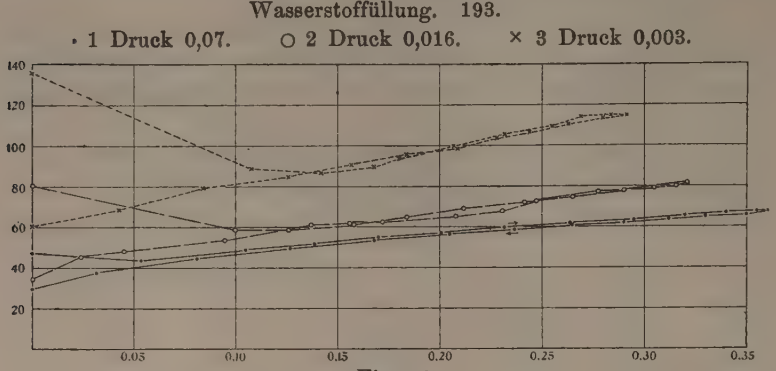



Fig. 26.

stellen die Charakteristiken dar, die bei drei verschiedenen Drucken während des Evakuierens erhalten wurden. Durch Vergrößerung des Druckes wird die Entladungsspannung herabgesetzt, die Maximalstromstärke vergrößert und die Hysteresis für den ganzen Verlauf der Kurve positiv.

#### 4. Die Charakteristiken bei Sauerstoffüllung.

Nach Erneuerung des Kathodenbleches wurde die Entladungsröhre in ähnlicher Weise wie früher mit Wasserstoff, jetzt mit Sauerstoff gefüllt (wiederholte Füllung und Auspumpen) und Quecksilberdampf durch Abkühlung ferngehalten. Käuflicher Sauerstoff wurde durch Wasser, Schwefelsäure und Chlorcalcium in die Röhre geleitet.

Die neue Kathode war ein wenig breiter als die alte. Da nun eine Vergrößerung des Heizstromes erforderlich gewesen wäre, um die frühere Temperatur wieder zu erreichen, die jedoch eine Gefährdung der Röhre bedeutet hätte, so wurden die Aufnahmen, außer 202, bei einer Temperatur von nur 1250° statt 1300° gemacht. Deshalb ist der Grenzstrom kleiner. Dies

erklärt die Tendenz der Charakteristiken, bei den maximalen Spannungen vertikal zu verlaufen.

*α*) Aufnahme 197, Fig. 27. Heizstrom, Maschinenspannung, Vorschaltwiderstand, Druck konstant. Abzweigspannung durch Verschiebung des Kontaktes *A*, Fig. 3, variiert. Die Figur zeigt, daß die Grenzstromstärke, die in diesem Bereiche sehr empfindlich gegen Temperaturänderung ist, mit abnehmender Maximalspannung abnimmt,

**Füllung — Sauerstoff. Druck 0,0025. Temp. der Kathode 1250°.**
**197 Angelegte Spannung durch Abzweigwiderstand variiert.**
**· 1. ○ 2. × 3.**

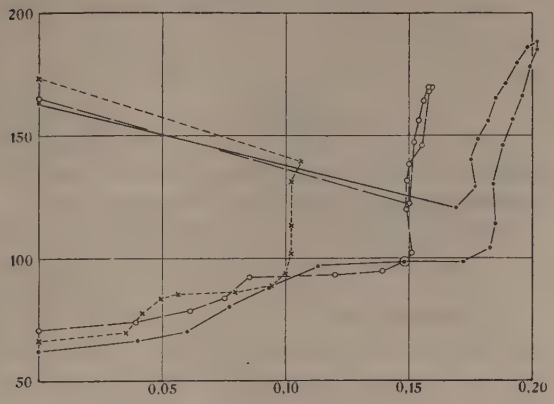



**Fig. 27.**

wohl wegen des Einflusses der sekundären Heizung der Kathode. Wie die Kurven zeigen, setzt der Strom bei einer konstanten Zündspannung ein, springt mit sinkender Spannung plötzlich auf seinen Maximalwert (die Grenzstromstärke bleibt fast konstant, wenn die Spannung wieder steigt) und kehrt bei erheblich niedrigeren Spannungswerten nach Null zurück. Die Spannungen sind im allgemeinen von derselben Größenordnung, wie die für Wasserstoffüllung. Der Wendepunkt bei abnehmender Spannung ist wieder deutlich zu sehen.

*β*) Aufnahme 199, Fig. 28. Heizstrom, Abzweigspannung, Druck konstant. Vorschaltwiderstand variiert. Diese Kurven unterscheiden sich von denen des

Sauerstoffüllung. Druck 0,0025.
199 Vorschaltwiderstand variiert, 300 bis ca. 1800 Ohm.
· 1. ○ 2. × 3. △ 4.

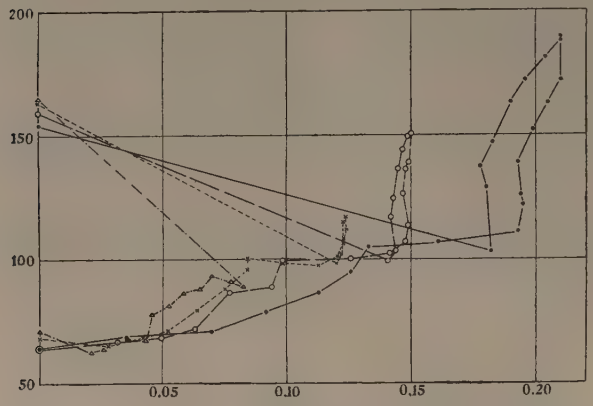



Fig. 28.

Sauerstoffüllung. Druck 0,0025. Angelegte Spannung 230 Volt.
Vorschaltwiderstand 300 Ohm. Heizstrom variiert.
198 · 1 Heizstrom 10 Amp. Temperatur der Kathode 1250°.
○ 2 „ 9,65 „
× 3 „ 9,00 „
△ 4 Temperatur 1300°.

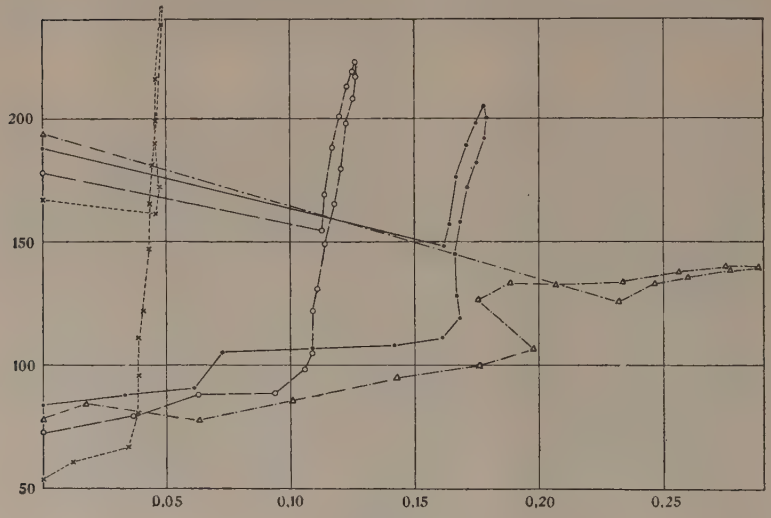



Fig. 29.

Falles $\alpha$ nur durch einen größeren Spannungsabfall, wenn der Strom einsetzt. Dies ist direkt dem größeren Spannungsabfall in dem Vorschaltwiderstande zuzuschreiben.

$\gamma$) Aufnahme 198, Fig. 29. Abzweigspannung, Vorschaltwiderstand, Druck konstant. Kathodentemperatur variiert. Bei der Kathodentemperatur von 1300° sieht man keine Spur von einer Grenzstromstärke, der Wendepunkt aber tritt bei abnehmender Spannung sehr deutlich hervor. Bei Temperaturen niedriger als 1250° wird das Ende der Schleife nach oben umgebogen, was immer geschieht, wenn die Grenzstromstärke erreicht ist.

$\delta$) Aufnahmen 200, 201, Fig. 30. Kathodentemperatur, Abzweigspannung, Vorschaltwiderstand konstant. Druck variiert. Diese Kurven zeigen, daß bei

**Sauerstoffüllung. Angelegte Spannung 140 Volt. Vorschaltwiderstand 300 Ohm. 200, 201. Druck variiert.**
**• 200,1. Druck 0,129. ○ 200,2. Druck 0,042.**
**× 201,2. „ 0,014. △ 201,1. „ 0,009.**
**+ 201,3. Druck 0,0025.**

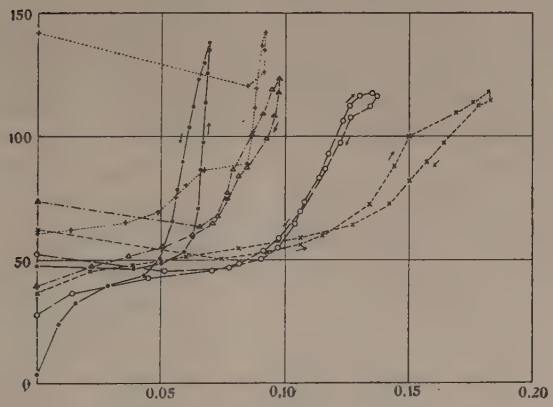



Fig. 30.

einem Druck von ca. 0,014 mm eine Maximalgrenzstromstärke existiert, und daß bei Vergrößerung des Druckes, wenigstens bis auf einen Druck von 0,129 mm, die Zünd- und die Löschspannung sinken. Bei dem größten Drucke bildet die Charakteristik eine Schleife mit dem negativen Umlaufssinn.

### D. Zusammenfassung der Ergebnisse.

Durch die vorstehend beschriebenen Versuche sind die folgenden Tatsachen in Erscheinung getreten:

1. Es tritt bei Betrieb mit Wechselstrom in der Wehneltröhre eine beträchtliche Hysteresis auf, d. h. der Strom setzt bei einer bestimmten Spannung (Zündspannung) ein, verläuft danach auf einer Kurve, die sich dem Glimmstromgebiete der statischen Charakteristik anpaßt, und kehrt dann um, läuft zunächst der Kurve wachsenden Stromes sehr benachbart zurück, um dann bei kleiner werdendem Strome auf sehr viel tieferen Spannungswerten nach Null zurückzukehren.

2. Die Neigung der gebildeten Schleifen variiert durchaus im Einklang mit der Abhängigkeit der statischen Charakteristik von der Temperatur, wobei zu beachten ist, daß der Entladungsstrom selbst die Temperatur der Kathode mit beeinflußt, ferner, daß eine einmal erreichte Temperatur sich nachwirkend geltend macht, daß also eine Temperaturträgheit der Kathode besteht.

3. Die Zündspannung ist bei gegebenem Drucke und gegebener Wechselstromfrequenz offenbar eine Konstante der Röhre. Sie erweist sich namentlich auch von der Glühtemperatur der Kathode unabhängig, ein Beweis, daß sie nicht, bzw. nur sehr sekundär, durch Vorgänge an der Kathode bestimmt ist.

4. Die Zündspannung sinkt mit zunehmendem Drucke.

5. Die Zündspannung hängt von der Gasfüllung des Rohres ab. Befreit man das Gas vom Hg-Dampf, so rücken die ganzen Kurven, also auch die Zündspannungen, zu beträchtlich höheren Werten. In den verschiedenen untersuchten Gasen, Luft mit Hg-Dampf, Luft ohne Hg-Dampf, Wasserstoff und Sauerstoff liegen die Kurven und die Zündspannung für Luft am höchsten, dann die für Sauerstoff und Wasserstoff und schließlich die für Luft mit Hg-Dampf.

6. Die Zündspannung wächst mit zunehmender Frequenz.

7. In den absteigenden Ästen der Kurven zeigt sich fast durchweg ein Wendepunkt, der auf einen Wechsel in dem Mechanismus der Entladungsform schließen läßt.

## IV. Diskussion.

Um zu einer ionentheoretischen Erklärung dieser Tatsachen zu gelangen, machen wir uns klar, daß die Zündspannung offenbar den Moment kennzeichnet, wo die bisher unipolar durch die aus der Glühkathode austretenden Elektronen vermittelte Entladung durch das Auftreten von Stoßionisation in eine dipolare verwandelt wird. Die Stoßionisation muß an der Anode beginnen. Um das einzusehen, denken wir uns den ganzen Raum zwischen Anode und Kathode zunächst gleichmäßig mit Elektronen erfüllt. Von dem Vorhandensein anderer Gase sehen wir ab, d. h. wir denken uns einen überaus kleinen Druck in der Röhre hergestellt. Wird jetzt eine Spannung angelegt, so werden die Elektronen nach der Anode hin beschleunigt. Je näher ein Elektron an die Anode kommt, desto größere Geschwindigkeit hat es. Darum wird sich ganz von selbst eine Spannungsverteilung herstellen müssen, die das größte Potentialgefälle vor der Anode hat. Durch die Anwesenheit eines Gases von sehr niedrigem Druck wird dieses Verhalten wenig modifiziert werden können, d. h. wir haben in unserer Röhre stets das größere Potentialgefälle vor der Anode zu erwarten. Vermehrt man die Gesamtspannung, so muß also vor der Anode zuerst ein so großes Spannungsgefälle erreicht werden, daß die Elektronen auf einer freien Weglänge die zur Stoßionisierung erforderliche Energie aufnehmen können. Sobald das eintritt, werden die bei der Stoßionisation gebildeten negativen Ionen sofort an die Anode treten, die positiven Ionen lagern vor der Anode und tragen dazu bei, das Anodengefälle weiter zu erhöhen. Da sie gleichzeitig nach der Kathode hin zu wandern beginnen, so beginnt eine Verschiebung der Potentialverteilung einzusetzen, die, wenn man die Spannung konstant hält, schließlich zu einem stationären Zustande führen wird, der nach einer gewissen Zeit erreicht sein wird, sobald nämlich eine bestimmte, diesem statischen Zustande entsprechende Verteilung der Ionendichte längs der ganzen Bahn stattgefunden hat. Dabei kann es passieren, daß durch diese Verschiebung der Ionenkonzen-

tration das Gefälle vor der Anode wieder kleiner wird und unter den für die Stoßionisation erforderlichen Wert heruntersinkt. Alsdann wird der Glimmstrom von selber wieder aufhören und die alte Ionenverteilung sich wieder herstellen. Nun kann das Anodengefälle wieder wachsen, bis die Bedingungen

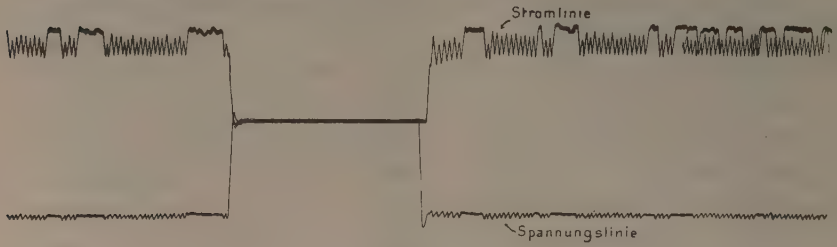



**Fig. 31.**

für die Stoßionisation wieder hergestellt sind und der Glimmstrom aufs neue einsetzt. Ebensolche pulsierenden Ströme sind bei Gleichstrombetrieb in den Versuchen, Figg. 18 und 31, sowie auch gelegentlich bei Wechselstrombetrieb beobachtet worden.

Wenn wir einen solchen Mechanismus für die Entladung des Wehneltrohres zugrunde legen, so haben wir den Schlüssel zur Erklärung der oben beobachteten Erscheinungen gewonnen. Denn man sieht, daß alsdann die Zündspannung, da ja wegen der aus der glühenden Oxydkathode erfolgten Elektronenüberschwemmung der Kathodenfall verschwindet, den Anodenfall zum Ausdruck bringt, der erforderlich ist, um eine dauernde Stoßionisierung aufrecht zu erhalten. Das Erreichen dieses Anodenfalles muß eine gewisse Verzögerung erfahren, d. h. es muß sich nach Beginn des Ionenstoßes zunächst eine entsprechende Ionenverteilung in dem Entladungsraum hergestellt haben. Daß in der Tat eine gewisse Zeit erforderlich ist, ehe ein stationärer Strom eingetreten ist, zeigen die Versuche mit Gleichspannung, Fig. 32. Man sieht dort, daß die Spannung stets erst eine bestimmte Zeit angelegt sein muß, ehe der Strom einsetzen kann. Daß die Zündspannung unter sonst gleichen Bedingungen lediglich von dem Gasdruck abhängt, ist nach unserer Theorie ohne weiteres klar, denn

der Druck bestimmt die freie Weglänge, und erst wenn die Stoßionisierungsspannung auf der freien Weglänge vorhanden

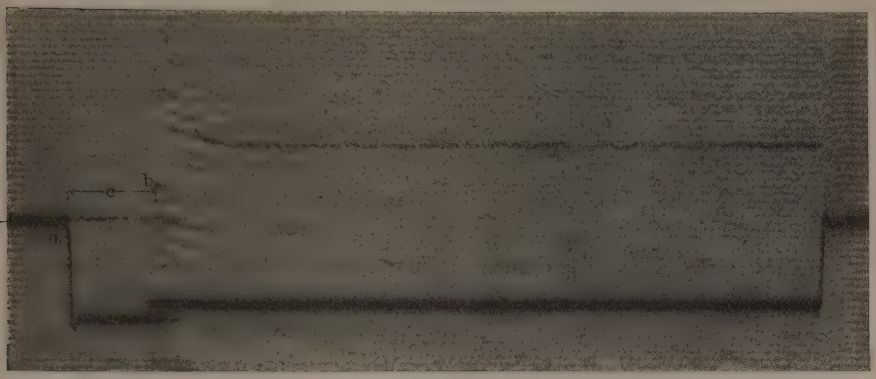
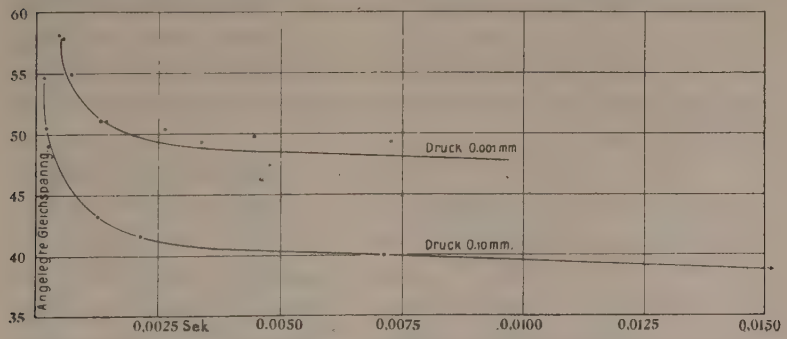



Fig. 32.

$a$ = Punkt, wo Spannung angelegt wurde.
$b$ = Punkt, wo Strom einsetzt.
$c$ = Verzögerung.

ist, kann das ganze Phänomen des Glimmstromes einsetzen. Wird die Röhre mit höherer Frequenz betrieben, so bleiben die Spannungswerte relativ kürzer angelegt wie bei niedrigerer




Zeitdauer zwischen Anlegen der Spannung und Einsetzen des Stromes.
Fig. 33.

Frequenz. Aus diesem Grunde wird die Zündspannung bei höherer Frequenz höher liegen müssen. Auch hierfür liefern die Versuche mit Gleichspannung die Belege. Je niedriger

die angelegte Gleichspannung war, desto länger dauerte es, bis die Zündung einsetzte, siehe Fig. 33.

Auffällig konnte zunächst erscheinen, daß die Zündung mit zunehmendem Druck abnimmt. Denn da die freie Weglänge mit zunehmendem Drucke kleiner wird, so wäre zu erwarten, daß vielmehr eine höhere Zündspannung vorhanden sein müßte, wenn der Druck steigt. Indessen ist hier ja eine von den übrigen Gasentladungen her wohlbekannte Tatsache zu beachten. Zwei Einflüsse des zunehmenden Druckes lagern sich mit entgegengesetzter Wirkung übereinander. Die abnehmende freie Weglänge, welche die Spannung zu erhöhen sucht, und die zunehmende Dichte, welche für die Ionisierung durch Ionenstoß mehr Gelegenheit schafft und daher die Spannung verkleinert. Je nachdem der eine oder andere Einfluß überwiegt, muß mit zunehmendem Drucke die Zündspannung abnehmen oder zunehmen. Bei den niedrigen Drucken, mit denen bei unseren Versuchen gearbeitet wurde, überwiegt offenbar die mit zunehmendem Drucke wachsende Ionenstoßdichte. Würde man zu genügend hohen Drucken übergehen, so würde man vermutlich zu einem Zündspannungsminimum kommen, von dem ab mit weiter zunehmendem Drucke wieder eine Zunahme der Zündspannung erfolgen würde. Alles das geschieht aber nur, solange durch den Elektronenaustritt aus der glühenden Oxydkathode eine Beteiligung des Kathodenfalles an der Gesamtspannung möglichst zurückgedrängt wird.

Auch die Tatsache der Hysteresis erklärt sich jetzt zwanglos durch unsere Auffassung: Da die Ausbildung der für den Glimmstrom erforderlichen Ionenverteilung eine gewisse Zeit braucht, so muß auch die einmal ausgebildete Ionenverteilung eine gewisse Zeit brauchen, ehe sie wieder verschwindet. Eben das ist es, was durch die Hysteresis unserer Kurven zum Ausdruck gebracht wird. Die Gleichstromversuche, Fig. 17, bestätigen dies wieder. An ihnen ist zu erkennen, daß ein und dieselbe Spannung imstande ist, sehr verschiedene Stromstärken durch die Röhre zu führen. Eine kleine Stromstärke, solange nur unipolare Entladung und die ihr entsprechende

Ionenverteilung in Frage kommt; in diesem Fall ist die Gesamtspannung relativ gleichmäßig über den ganzen Entladungsraum verteilt und das Gefälle nimmt nur langsam nach der Anode hin zu. Eine große Stromstärke, wenn nach dem Einsetzen der Stoßionisation dipolare Leitung eingesetzt hat, und sich eine Ionenverteilung hergestellt hat, die einen genügend großen Anodenfall dauernd sicherstellt.

## V. Ergebnisse.

1. Es wurden statische und dynamische Charakteristiken der Wehneltschen Ventilröhre gemessen.

2. Es wurden die Änderungen der dynamischen Charakteristiken verfolgt, die eintreten, wenn eine der Bestimmungsgrößen, Spannung, Vorschaltwiderstand, Kathodentemperatur, Druck, Frequenz, Gasfüllung variiert wurde.

3. Es wurde gefunden, daß die dynamischen Charakteristiken des Wehneltschen Ventilrohres Hysteresis aufweisen.

4. Es wurde eine ionentheoretische Erklärung der beobachteten Erscheinungen gegeben, deren Kern ist, daß bei der Herstellung der für die Glimmentladung erforderlichen räumlichen Ionenverteilung eine gewisse Verzögerung in Erscheinung tritt.

Meinem verehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr. H. Th. Simon, bin ich zu großem Danke verpflichtet für die mannigfachen Ratschläge und Unterstützungen, die er der vorliegenden Arbeit entgegenbrachte.

Auch dem Assistenten des Instituts, Herrn Dr. H. Busch, danke ich für manchen Rat und seine stete Hilfsbereitschaft.

# Lebenslauf.

Ich, Royal A. Porter, evangelischer Konfession, bin am 8. Februar 1877 als Sohn des Gutsbesitzers George E. Porter zu Adair, im Staate Illinois der Vereinigten Staaten Amerikas geboren, deren Staatsangehöriger ich bin. Dort besuchte ich die öffentliche Vorschule. Nachdem ich drei Jahre auf der „Normal School" in Macomb, Illinois, und zwei Jahre in einer Privatschule in Evanston zugebracht hatte, ließ ich mich 1897 im College of Liberal Arts of Northwestern University in Evanston-Chicago immatrikulieren, wo ich 1901 den Grad „Bachelor of Science" erwarb. Während des nächsten Jahres war ich „Fellow in Physics" an derselben Universität, die mir 1902 nach einem Studium von zwei Semestern auf Grund einer Dissertation den Grad „Master of Science" erteilte. 1903 bis 1910 war ich Dozent an Syracuse University im Staate New York. Von Michaelis 1910 ab studierte ich an der Universität Göttingen.

Ich besuchte die naturwissenschaftlichen und mathematischen Vorlesungen, Seminare und Übungen der Herren: an der Northwestern University: Basquin, Crew, Holgate, White; an der Universität Göttingen: Bestelmeyer, Hilbert, Prandtl, Riecke, Runge, v. Sanden, Simon, Voigt, Weyl, Wiechert.

Die folgenden wissenschaftlichen Schriften habe ich veröffentlicht:

„The Influence of Atmospheres of Nitrogen and Hydrogen on the Arc Spectra of Iron, Zinc, Magnesium, and Tin, compared with the Influence of an Atmosphere of Ammonia", Astrophysical Journal 13. p. 274—281. 1902; auch in Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences 38. p. 373—379, 1902.

„Laboratory Apparatus for Measurement of the Force on a current-carrying conductor lying in a magnetic Field", Science 26. p. 53—56. 1907.